
РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 664.2

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕСТРУКЦИИ КРАХМАЛА

М. А. АТРОШКО¹⁾, В. В. ЛИТВЯК²⁾, С. Н. ШАХАБ¹⁾, В. А. КРАВЧЕНКО¹⁾, А. Н. БАТЯН¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья –
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха»,
ул. Некрасова, 11, 140051, Красково, Люберецкий район, Московская обл., Россия

Образец цитирования:

Атрошко МА, Литвяк ВВ, Шахаб СН, Кравченко ВА, Батян АН. Квантово-химическое моделирование радиационно-индуцированной деструкции крахмала. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:48–56.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-48-56>

For citation:

Atroshko MA, Litvyak VV, Shahab SN, Kravchenko VA, Balyan AN. Quantum-chemical simulation of radiation-induced destruction of starch. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:48–56. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-48-56>

Авторы:

Михаил Александрович Атрошко – аспирант кафедры экологической химии и биохимии; младший научный сотрудник.

Владимир Владимирович Литвяк – доктор технических наук, доцент; главный научный сотрудник.

Сиямак Насер Шахаб – кандидат химических наук, доцент; заведующий кафедрой экологической химии и биохимии.

Вячеслав Анатольевич Кравченко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры экологической медицины и радиобиологии.

Анатолий Николаевич Батян – доктор медицинских наук, профессор; заведующий кафедрой экологической медицины и радиобиологии.

Authors:

Mikhail A. Atroshko, postgraduate student at the department of ecological chemistry and biochemistry; junior researcher.

atroshkomikhail@gmail.com

Vladimir V. Litvyak, doctor of science (technical), docent; chief researcher.

besserk1974@mail.ru

Siyamak N. Shahab, PhD (chemistry), docent; head of the department of ecological chemistry and biochemistry.

siyamakshahab@mail.ru

Vyacheslav A. Kravchenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of environmental medicine and radiobiology.

kravchenko.v.anat@gmail.com

Anatoly N. Balyan, doctor of science (medicine), full professor; head of the department of environmental medicine and radiobiology.

ant_b@tut.by

Воздействие на нативный крахмал ионизирующим излучением является перспективной и экологически безопасной технологией целенаправленного изменения физико-химических свойств крахмала. Экологичность облученного крахмала обусловлена прежде всего его свойством сорбировать тяжелые металлы и радиоактивные изотопы. Кроме того, облученный крахмал может применяться в технических целях в различных отраслях современного хозяйственного комплекса: целлюлозно-бумажной промышленности, медицине, строительной промышленности, деревообработке, литьевом (литейном) производстве. Крахмал может выступать в качестве пищевого волокна с пребиотическими свойствами и способен расщепляться ферментными системами микроорганизмов кишечника, а также активно участвовать в процессе его перистальтики.

Объектом исследования служили молекулы, которые образуются в химических реакциях, протекающих при радиационном облучении крахмала. Установлено, что облучение полисахаридов снижает их точку плавления и вращение плоскости поляризации, приводит к потемнению, образованию формальдегида. При облучении дозой свыше 150 кГр повреждается кристаллическая часть крахмала, уменьшается его молекулярная масса и длина цепи. При облучении дозой свыше 600 кГр уменьшается степень полимеризации крахмала, что приводит к снижению удельной вязкости амилозы и амилопектина. С увеличением дозы облучения повышается растворимость крахмала в воде. При его облучении изменяется чувствительность к ферментам и происходит разрыв α -1 \rightarrow 4-гликозидных связей. Редуцирующая способность крахмала увеличивается пропорционально дозе облучения (начиная с дозы 10 кГр), возрастает кислотность (активатор – кислород), но снижается с увеличением его влажности. При облучении крахмала образуются фрагменты полиозидных цепей частично деградированных декстринов различной длины, а также продукты радиолитического распада (оксиметилфурфурол, формалин и др.). Образуются также свободные кислоты и сложные эфиры, которые гидролизуются в условиях предельных значений pH, повышая кислотность. Методами квантовой химии доказана принципиальная возможность образования в крахмале свободных радикалов и их последующее взаимодействие с полимером. Найдены наиболее стабильные конформеры по значениям полной энергии молекул и рассчитаны их физико-химические свойства.

Ключевые слова: крахмал; радиационное облучение; свободный радикал; теория функционала плотности.

QUANTUM-CHEMICAL SIMULATION OF RADIATION-INDUCED DESTRUCTION OF STARCH

M. A. ATROSHKO^a, V. V. LITVYAK^b, S. N. SHAHAB^a, V. A. KRAVCHENKO^a, A. N. BATYAN^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bAll-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing –
Branch of Russian Potato Research Centre,

11 Nekrasov Street, Kraskovo 140051, district Luberetskiy, Moscow region, Russia
Corresponding author: M. A. Atroshko (atroshkomikhail@gmail.com)

Exposure to native starch by ionizing radiation is a promising and environmentally safe technology for purposefully changing the physico-chemical properties of starch. The environmental friendliness of irradiated starch due to the possibility of its use in various spheres of human life. It can be a good sorbent of heavy metals and radioactive isotopes. In addition, irradiated starch can also be successfully used for technical purposes in various branches of the modern economic complex: pulp and paper industry, medicine, construction industry, woodworking, injection molding. Starch can act as a dietary fiber with probiotic properties and is able to be broken down by the enzyme systems of intestinal microorganisms, as well as actively participate in the process of intestinal peristalsis.

The object of the study was the molecules formed in chemical reactions occurring during the radiation exposure of starch. It has been established that irradiation of polysaccharides reduces their melting point and rotation of the polarization plane, darkening is observed, and formaldehyde is formed. When irradiated with a dose of more than 150 kGy, the crystalline part of starch is damaged, its molecular weight and chain length decrease. When irradiated with a dose of more than 600 kGy, a decrease in the degree of starch polymerization is observed, which leads to a decrease in the specific viscosity of amylose and amylopectin. With an increase in the radiation dose, the solubility of starch in water increases. When irradiated, the sensitivity to enzymes changes and α -1 \rightarrow 4 bonds are broken. The reducing ability increases in proportion to the radiation dose (starting from a dose of 10 kGy), the acidity of starch increases (the activator is oxygen), but decreases with increasing moisture. When starch is irradiated, fragments of polyoside chains of various lengths of partially degraded dextrans are formed, as well as radiolysis products (hydroxymethyl furfural, formalin, etc.). Free acids and esters are also formed, which hydrolyze at pH extremes, increasing acidity. Quantum chemistry methods have proved the fundamental possibility of the formation of free radicals in food starch and the possibility of their subsequent interaction with the polymeric chains of starch. The most stable conformers were found from the values of the total energy of the molecules, and their physicochemical and antioxidant properties were calculated.

Keywords: starch; radiation exposure; free radical; density functional theory.

Введение

Облучение нативного крахмала ионизирующим излучением является перспективной и экологически безопасной технологией целенаправленного изменения его физико-химических свойств. Энергия воздействия ионизирующего излучения на нативный крахмал не вызывает появления радиоактивных изотопов углерода, водорода и кислорода. Атомы углерода, водорода и кислорода, составляющие мономеры крахмала (остатки глюкопиранозы), остаются стабильными после воздействия ионизирующим гамма-излучением.

Облученный крахмал является экологически безопасным продуктом: он не представляет опасности для окружающей среды и может найти широкое применение в хозяйственном комплексе (пищевой промышленности, медицине и технических целях).

Нативный крахмал после воздействия ионизирующим излучением и стабилизации физико-химических свойств в результате свободнорадикальных сшивок своих полимерных цепей (амилозы и амилопектина) приобретает свойства резистентности. Он становится слабо гидролизуемым амилолитическими ферментами и слабо растворимым в воде при нагревании. Такой крахмал (глюкоолигосахариды) может выступать в качестве пищевого волокна с пребиотическими свойствами и способен расщепляться ферментными системами микроорганизмов кишечника, а также активно участвовать в процессе его перистальтики. Он может быть хорошим сорбентом тяжелых металлов и радиоактивных изотопов. Кроме того, облученный крахмал может с успехом быть использован для технических целей в различных отраслях современного хозяйственного комплекса: целлюлозно-бумажной промышленности, медицине, строительной промышленности, деревообработке, литейном производстве.

Нативные крахмалы и крахмалы с целенаправленно измененными физико-химическими свойствами – важные коммерческие продукты, которые находят широкое применение в различных областях промышленности [1–5].

В то же время информация о механизмах целенаправленного изменения физико-химических свойств крахмала в литературе практически отсутствует [6].

Цель исследования – определить принципиальную возможность образования в крахмале свободных радикалов в ответ на облучение ионизирующим излучением и оценить возможность их последующего взаимодействия с полимерными цепями крахмала.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования служили молекулы, которые образуются в химических реакциях, протекающих при облучении крахмала высокоэнергетическими электронами.

Расчеты с применением метода теории функционала плотности (DFT) для соединений проведены с помощью функционала *RB3LYP* в базе $6-31++G^*$ [7; 8]. Все квантово-химические расчеты выполнены с использованием программного пакета *Gaussian 16* и программы для визуализации результатов *GaussView 06* на персональном компьютере с процессором *intelcore i7* (2.21 GHz CPU) с установленной операционной системой *Ubuntu 18.04*. Для расчета эффекта растворителя был использован метод IEFPCM. Формализм интегральных уравнений PCM является наиболее популярной версией PCM. В нем используется полость в форме молекулы, состоящая из центрированных на ядрах сфер.

Для расчета спектров поглощения соединений была использована зависящая от времени теория функционала плотности (TD-DFT). Теоретические спектры поглощения оптимизированных соединений рассчитаны с применением метода TD-RB3LYP в базе $6-31++G^*$, где растворителем была вода.

В работе рассчитаны полные электронные плотности (DOS), потенциал ионизации (IP), сродство к электрону (EA), глобальная твердость (η), электроотрицательность (χ), электронный химический потенциал (μ), электрофильность (ω) и химическая мягкость (S) соединений. Потенциал ионизации определяется как количество энергии, необходимое для удаления электрона из молекулы, сродство к электрону – как энергия, выделяемая при добавлении протона в систему. Это связано с энергией E_{HOMO} и E_{LUMO} соотношениями (1) и (2):

$$\text{IP} = -E_{\text{HOMO}}, \quad (1)$$

$$\text{EA} = -E_{\text{LUMO}}. \quad (2)$$

По значениям IP и EA можно определить электроотрицательность и общую жесткость (η) соединений. Электроотрицательность характеризуется мерой силы атома или группы атомов притягивать электроны, жесткость – свойством, определяющим их стабильность и реакционную способность. Эти показатели можно определить и количественно оценить с помощью уравнений (3) и (4):

$$\eta = (\text{IP} - \text{EA})/2, \quad (3)$$

$$\chi = (\text{IP} + \text{EA})/2. \quad (4)$$

Общая жесткость соответствует энергетическому разрыву LUMO-HOMO. Молекула с небольшим энергетическим разрывом обладает высокой химической реактивностью, низкой кинетической стабильностью и является мягкой молекулой, в то время как твердая молекула обладает большим энергетическим разрывом.

Химическую мягкость (S) – мера способности атома или группы атомов принимать электроны, которую можно оценить с помощью формулы (5):

$$S = 1/\eta. \quad (5)$$

Электронный химический потенциал (μ) рассчитывается по формуле (6):

$$\mu = -(IP + EA)/2. \quad (6)$$

Индекс электрофильности (ω), представляющий собой меру снижения энергии в связи с максимальным потоком электронов между донором и акцептором, определяется уравнением (7):

$$\omega = \mu^2 / 2\eta. \quad (7)$$

Согласно определению, этот индекс указывает на склонность химических частиц принимать электроны. Сильный нуклеофил характеризуется более низким значением μ , ω , а сильный электрофил – высоким значением μ , ω .

Карты молекулярного электростатического потенциала (МЭП) показывают электронную плотность в молекулах и весьма информативны в отношении распределения ядерных и электронных зарядов молекул.

На поверхности МЭП красный цвет относится к обогащенной электронами (отрицательной) области, синий цвет – к бедной электронами (положительной) области, а зеленый цвет обозначает нулевой электростатический потенциал.

Результаты исследования и их обсуждение

Ранее установлено [9; 10], что облучение вызывает произвольный, а не систематический разрыв α -1 \rightarrow 4 гликозидных связей крахмала. Редуцирующая способность увеличивается пропорционально дозе облучения крахмала (начиная с дозы 10 кГр), возрастает кислотность (активатор – кислород), но снижается с его увеличением влажности. При облучении образуются фрагменты полиозидных цепей частично деградированных декстринов различной длины, а также продукты радиолитического распада (оксиметилфурфурол, формалин и др.). Также образуются свободные органические кислоты и сложные эфиры, что повышает общую кислотность.

При облучении влажного крахмала образуются радикалы воды OH и e , которые, с одной стороны, ускоряют деструкцию и окисление крахмала, а с другой – способствуют рекомбинации и элиминации радикалов.

На устойчивость свободных радикалов влияют и ионы водорода (H^+), в присутствии которых радикалы также рекомбинируются и исчезают.

Свободнорадикальные механизмы облучения крахмала можно представить следующим образом (рис. 1) [9].

Проведенные квантово-механические расчеты и поиск равновесной геометрии молекул I и II (рис. 2) подтверждают возможность протекания химических реакций по свободнорадикальному механизму после облучения нативного крахмала (табл. 1 и 2).

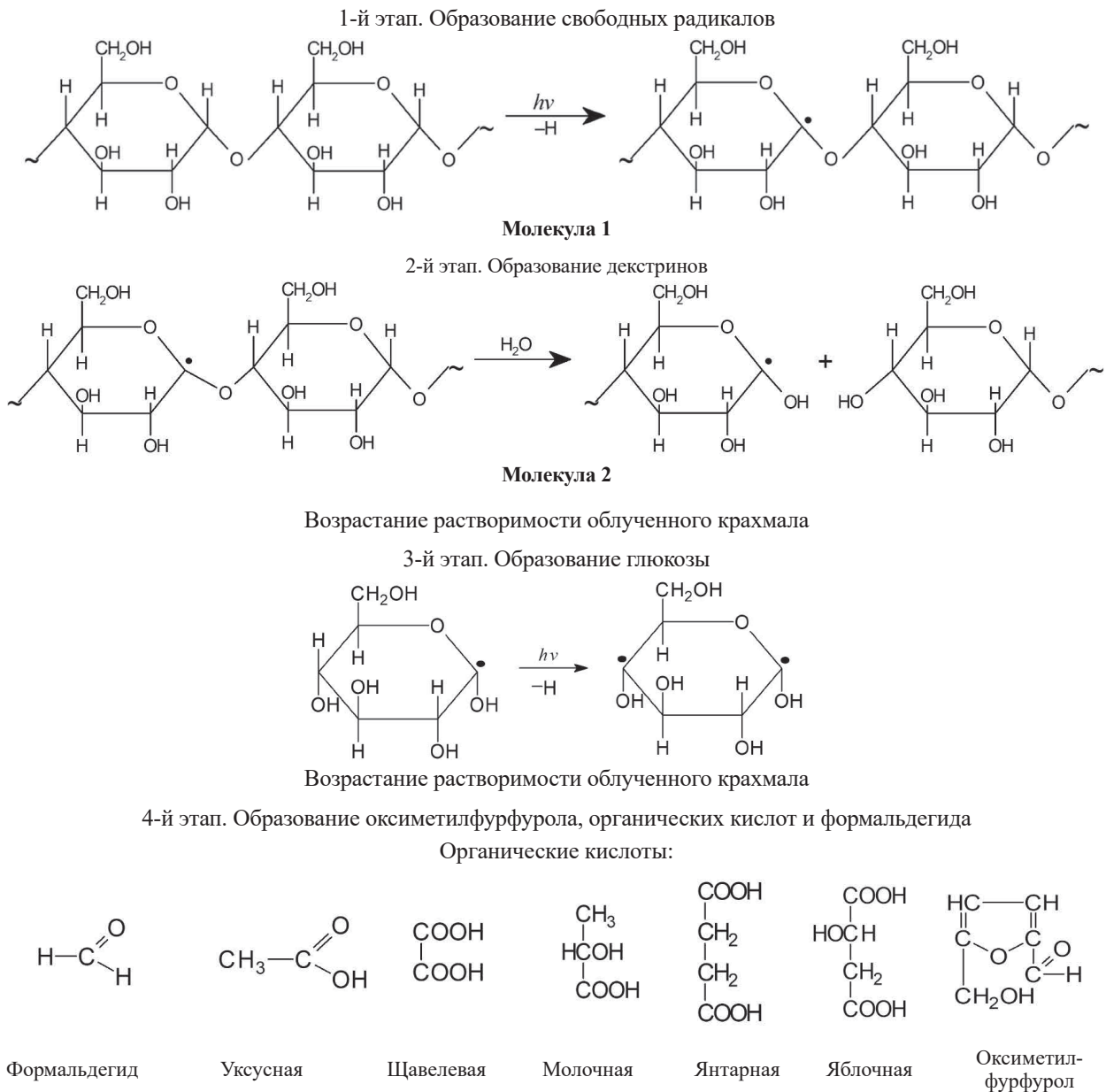
Таблица 1:

Рассчитанные электронные спектры поглощения молекул крахмала I и II

Table 1:

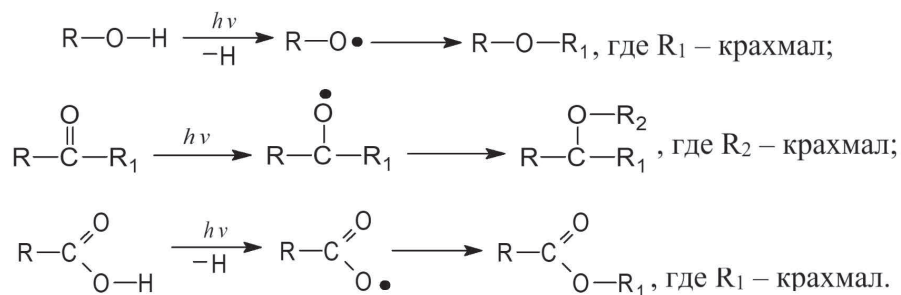
Calculated electronic absorption spectra of starch molecules I and II

Состояние	Длина волны, нм	Разложение волновых функций по однократно возбужденной конфигурации	Сила осциллятора (f)
Рассчитанный электронный спектр поглощения молекулы I			
$S_0 \rightarrow S_{13}$	236,21	$0,11(91 \rightarrow 10) - 0,25(91 \rightarrow 102) - 0,15(82 \rightarrow 91) - 0,13(83 \rightarrow 91) - 0,28(85 \rightarrow 91) + 0,17(86 \rightarrow 91) - 0,30(87 \rightarrow 91) - 0,43(88 \rightarrow 91) + 0,68(89 \rightarrow 91)$	0,0969
Рассчитанный электронный спектр поглощения молекулы II			
$S_0 \rightarrow S_{14}$	227,41	$-0,11(96 \rightarrow 104) - 0,28(96 \rightarrow 105) + 0,14(96 \rightarrow 106) + 0,77(96 \rightarrow 107) + 0,11(96 \rightarrow 108) + 0,25(96 \rightarrow 109) + 0,28(96 \rightarrow 110) + 0,22(96 \rightarrow 111) + 0,16(96 \rightarrow 114)$	0,0279



Возрастание общей титруемой кислотности облученного крахмала

5-ый этап. Перегруппировка и сшивка полимерных цепей крахмала (амилозы и амилопектина)



Резкое понижение растворимости и кислотности облученного крахмала. Образующийся полимер нерастворим в холодной воде, слабо гидролизуется амилолитическими ферментами (устойчив к действию ферментов)

Рис. 1. Возможные свободнорадикальные механизмы облучения крахмала

Fig. 1. Possible free-radical mechanisms of starch irradiation

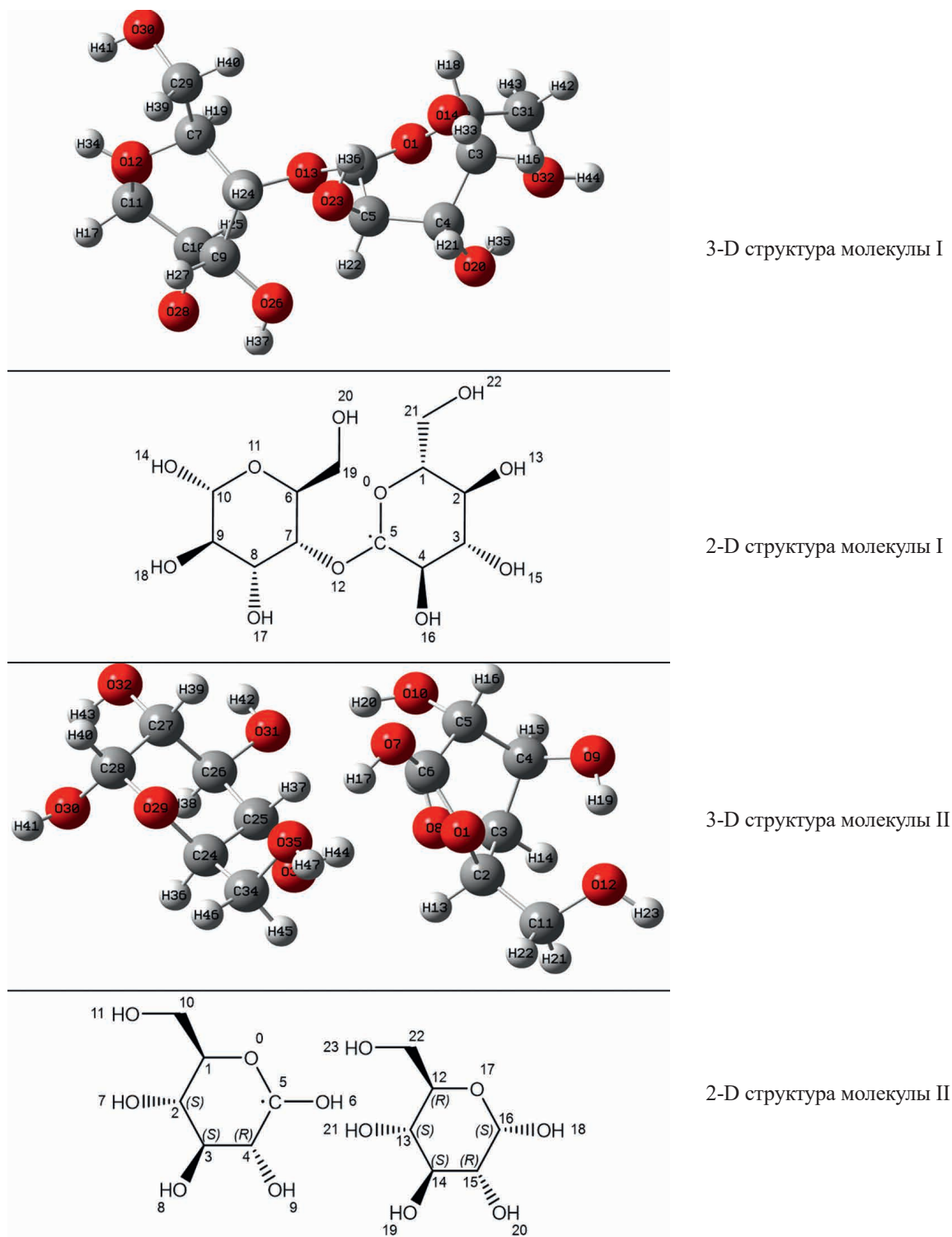


Рис. 2. Характеристики модельных молекул крахмала I и II

Fig. 2. Characteristics of model starch molecules I and II

Результаты расчета 20 возбужденных состояний соединения I приведены в табл. 2. Как видно, наиболее интенсивный пик поглощения соединения I при $\lambda_{\max} = 236,21$ нм наблюдается при силе осциллятора $f = 0,0969$.

Максимум длины волны обусловлен переносом заряда электрона в возбужденное синглетное состояние $S_0 \rightarrow S_{13}$, которое является волновой функцией, включающей несколько конфигураций для одноэлектронных возбуждений. Возбуждение электрона с 89В молекулярной орбитали на нижнюю вакантную молекулярную орбиталь 91В дает главный вклад в полосу поглощения при 236,21 нм. Самый сильный пик поглощения соединения II при $\lambda_{\max} = 227,41$ нм наблюдается при силе осциллятора $f = 0,0279$. Максимум длины волны обусловлен переносом заряда электрона в возбужденное синглетное состояние $S_0 \rightarrow S_{14}$, которое является волновой функцией, включающей несколько конфигураций для одноэлектронных возбуждений.

Другие возбужденные состояния соединений имеют очень малую интенсивность ($f \approx 0$) или запрещены по симметрии.

Анализ полных электронных плотностей показывает, что ширина запрещенной зоны соединения I составляет 0,17120 эВ. Общая твердость (η) соединения I составляет 0,17332 эВ (табл. 2).

Как показано на МЭП-карте (рис. 3), отрицательная область соединения I (красного цвета) сфокусирована на атомах O13 и O30, положительная область (синего цвета) локализована на атомах H34, H33.

Таблица 2

Электронные свойства модельных молекул крахмала I и II

Table 2

Electronic properties of model starch molecules I and II

Электронные свойства молекулы I		Электронные свойства молекулы II	
Свойства	Результаты	Свойства	Результаты
E_{HOMO} (eV)	-0,17545	E_{HOMO} (eV)	-0,18099
E_{LUMO} (eV)	-0,00425	E_{LUMO} (eV)	-0,00627
IP (eV)	0,17545	IP (eV)	0,18099
EA (eV)	0,00425	EA (eV)	0,00627
Eg (eV)	0,17120	Eg (eV)	0,17472
μ (eV)	-0,08985	μ (eV)	-0,09363
η (eV)	0,17332	η (eV)	0,17785
S (eV)	5,76950	S (eV)	5,62255
χ (eV)	0,17757	χ (eV)	0,18412
ω (eV)	0,00069	ω (eV)	0,00077
ω^+ (eV)	0,00402	ω^+ (eV)	0,00436
ω^- (eV)	0,01135	ω^- (eV)	0,01199

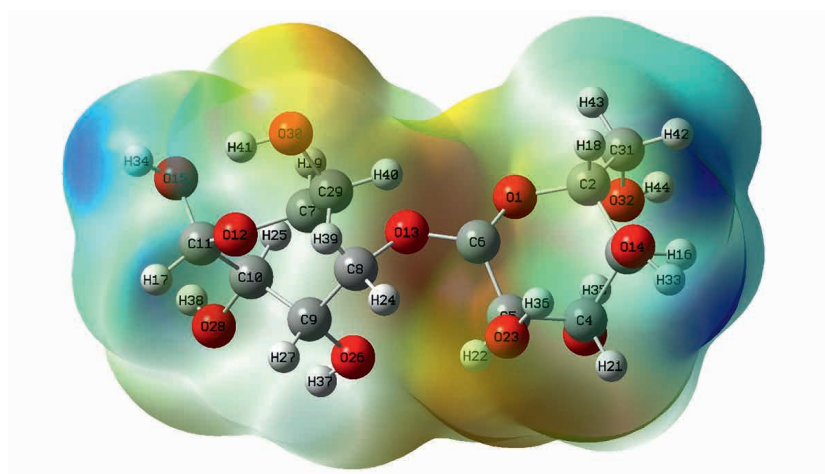


Рис. 3. Карта молекулярного электростатического потенциала молекулы I

Fig. 3. Molecular electrostatic potential map of molecule I

Согласно расчетам полных электронных плотностей, ширина запрещенной зоны соединения II составляет 0,1712 эВ, его общая твердость (η) – 0,173325 эВ (табл. 2)

Как следует из МЭП-карты соединения II (рис. 4), отрицательная область (красного цвета) локализована на атомах O9 и O10, положительная область (синего цвета) – на атомах H23, H47, H41.

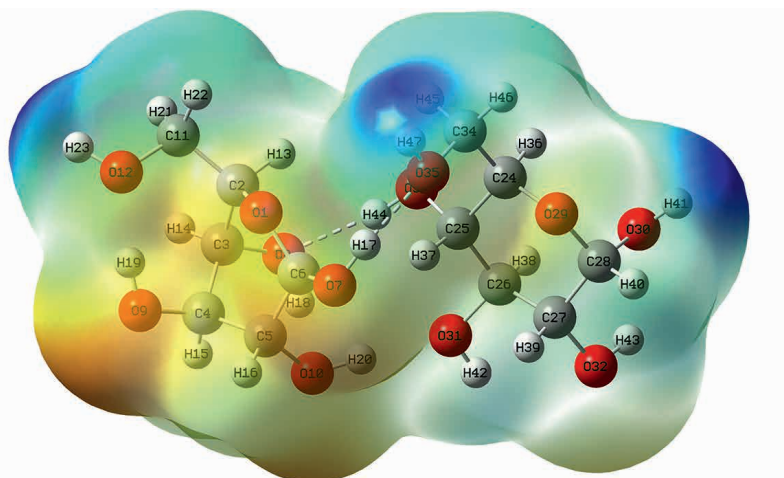


Рис. 4. Карта молекулярного электростатического потенциала молекулы II

Fig. 4. Molecular electrostatic potential map of molecule II

Следует отметить, что физико-химические свойства облученного крахмала не постоянны во времени. Свободные радикалы способны сохраняться до двух лет и оказывать значительное влияние на физико-химические свойства крахмала. Со временем растворимость и кислотность облученных крахмалов снижаются, что приводит к формированию структур, полностью нерастворимых в воде.

Заключение

Проанализировав данные исследования, приходим к следующим выводам.

1. В результате квантово-механических расчетов доказана принципиальная возможность образования в нативном крахмале при его облучении ионизирующим излучением свободных радикалов и их последующего взаимодействия с полимерными цепями крахмала.

2. Применяв неэмперический метод функционала плотности TD/B3LYP/6-31++G*, рассчитаны электронные спектры соединений I и II в водной среде, которые составляют $\lambda_{\max} = 236,21$ нм при $f = 0,0969$ и $\lambda_{\max} = 227,41$ нм соответственно при $f = 0,0279$.

3. Расчеты показали, что ширина запрещенной зоны для молекул I и II составляет 0,1712 и 0,17472 эВ соответственно.

4. Анализ молекулярного электростатического потенциала свидетельствует, что у соединения I наибольшей электронной плотностью характеризуются атомы O13 и O30, у соединения II – атомы O9 и O10.

5. Понимание механизма физико-химического воздействия ионизирующего облучения на крахмал позволит получать продукты различного состава и свойств, расширить сферу и эффективность их практического использования.

Библиографические ссылки

1. Sofi SA, Anjum Ayoub, Awsi Jan. Resistant starch as functional ingredient: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 2017;2(6):195–199.
2. Соломина ЛС, Соломин ДА. Исследования процесса получения амилопектинового фосфатного крахмала. *ХИПС*. 2018;1(3):27–35.
3. Руськина АА, Попова НВ, Науменко НВ, Руськин ДВ. Модификация крахмала с помощью ультразвукового воздействия как инструмент изменения его технологических характеристик. *Вестник ЮУрГУ. Серия Пищевые и биотехнологии*. 2017;5(3):12–20.
4. Кряжев ВН, Романов ВВ, Широков ВА. Последние достижения химии и технологии производных крахмала. *Химия растительного сырья*. 2010;1:5–12.
5. Литвяк ВВ, Лукин НД, Симаков ЕА, Дегтярев ВА, Кузьмина ЛГ, Кузина ЛБ. *Картофель и технологии его глубокой переработки*. Москва: ФЛИНТА; 2021. 893 с.
6. Литвяк В, Алексеев М, Канарский А. Формирование крахмальной гранулы и механизм химической модификации крахмала. *Наука и инновация*. 2016;1(3):63–67.

7. Shahab S, Alhosseini Almodarresiyeh H, Kumar R, Darroudi M. A study of molecular structure, UV, IR, and ¹H NMR spectra of a new dichroic dye on the basis of quinoline derivative. *Journal of Molecular Structure*. 2015;1:1088–1098.
8. Shahab S, Filippovich L, Sheikhi M, Kumar R, Dikumar E, Yahyaei H, Muravsky A. Polarization, excited states, trans-cis properties and anisotropy of thermal and electrical conductivity of the 4-(phenyldiazenyl)aniline in PVA matrix. *Journal of Molecular Structure*. 2017;1:1141–1156.
9. Литвяк ВВ, Батян АН, Кравченко ВА. Модификация физико-химических и экологических свойств крахмала в результате его электронного облучения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018;3:62–68.

References

1. Sofi SA, Anjum Ayoub, Awsi Jan. Resistant starch as functional ingredient: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 2017;2(6):195–199.
2. Solomina LS, Solomin DA. *Issledovaniya processa poluchenija amilopekinovogo fosfatnogo krakhmala* [Studies of the process of obtaining amylopectin phosphate starch]. *HIPS*. 2018;1(3):27–35. Russian.
3. Rus'kina AA, Popova NV, Naumenko NV, Rus'kin DV. *Modifikatsiya krakhmala s pomoshch'yu ul'trazvukovogo vozdeistviya kak instrument izmeneniya ego tekhnologicheskikh kharakteristik* [Modification of starch by means of ultrasonic exposure as a tool for changing its technological characteristics]. *Vestnik YuUrGU. Seriya Pishchevye i biotekhnologii*. 2017;5(3):12–20. Russian.
4. Kryazhev VN, Romanov VV, Shirokov VA. *Poslednie dostizheniya khimii i tekhnologii proizvodnykh krakhmala* [Recent advances in starch derivatives chemistry and technology]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials]. 2010;1:5–12. Russian.
5. Litvyak VV, Lukin ND, Simakov EA, Degtyarev VA, Kuz'mina LG, Kuzina LB. *Kartofel' i tekhnologii ego glubokoi pererabotki* [Potatoes and technologies of its deep processing]. Moscow: FLINT; 2021. 893 p. Russian.
6. Litvyak V, Alekseenko M, Kanarskii A. *Formirovanie krakhmal'noi granuly i mekhanizm khimicheskoi modifikatsii krakhmala* [Formation of starch granules and mechanism of chemical modification of starch]. *Nauka i innovatsiya* [Science and innovation]. 2016;1(3):63–67. Russian.
7. Shahab S, Alhosseini Almodarresiyeh H, Kumar R, Darroudi M. A study of molecular structure, UV, IR, and ¹H NMR spectra of a new dichroic dye on the basis of quinoline derivative. *Journal of Molecular Structure*. 2015;1:1088–1098.
8. Shahab S, Filippovich L, Sheikhi M, Kumar R, Dikumar E, Yahyaei H, Muravsky A. Polarization, excited states, trans-cis properties and anisotropy of thermal and electrical conductivity of the 4-(phenyldiazenyl)aniline in PVA matrix. *Journal of Molecular Structure*. 2017;1:1141–1156.
9. Litvyak VV, Batyan AN, Kravchenko VA. *Modifikatsiya fiziko-khimicheskikh i ekologicheskikh svoystv krakhmala v rezul'tate ego elektronnoho oblucheniya* [Modification of physico-chemical and environmental properties of starch as a result of its electron irradiation]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universitetata. Ekologiya* [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2018;3:62–68. Russian.

Статья поступила в редколлегию 28.02.2023.
Received by editorial board 28.02.2023.