

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА СОСТАВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП НА ПОВЕРХНОСТИ ЦВЕТОЧНОЙ ПЛЕНКИ ЗЕРНОВИКА И ПОРОШКА СЕМЯН ОВСА

© 2023 г. С. Р. Аллаяров^а, *, Т. Н. Руднева^а, С. В. Демидов^а, У. Ю. Аллаярова^а, Е. Н. Климанова^а

^аИнститут проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, 142432, Россия

*E-mail: sadush@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 26.05.2022 г.

После доработки 12.07.2022 г.

Принята к публикации 13.07.2022 г.

Исследовано влияние дозы γ -облучения на состав функциональных групп на поверхности цветочной пленки, зерновика и порошка семян овса. В результате радиолитического процесса повышается относительная интенсивность полос поглощения, связанная с колебаниями C=O, C–O–C и O–H-связей, появляются полосы поглощения ненасыщенных связей. При этом в спектре облученного овса сохраняются свойственные зерну овса полосы поглощения в ИК области. Следовательно, воздействие γ -излучения дозой до 3000 кГр не приводит к полному разрушению химических связей в структуре соединений, содержащихся в семенах овса. Структуры зерновика, пленки и целого зерна овса при относительно малых дозах облучения (до 600 кГр) остаются визуально не поврежденными. Однако при более высоких дозах облучения (1700–3000 кГр) зерна овса теряют первичную твердость и пленчатость, нарушается сплошность поверхности зерновика и целых зерен. Следует отметить, что первоначальный соломенно-желтый цвет ЦЗ овса в ходе радиолитического процесса постепенно меняется сначала на светло-коричневый, а затем на темно-коричневый с повышением дозы облучения в результате накопления в структуре полимера различных хромофорных групп (C=C, C=O), а также ауксохромной группы OH, вызывающей более глубокую интенсивность цвета, усиливая действия хромофорных групп. Изменения цвета зерен овса с повышением дозы γ -облучения овса указывает на радиационную карбонизацию и окисление макромолекул зерен.

Ключевые слова: гамма-облучение, ИК-Фурье спектры облученных зерен овса, радиационная карбонизация и окисление макромолекул

DOI: 10.31857/S0023119322060031, **EDN:** DCWAPY

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные первоначальные радиобиологические изыскания прошлых лет проложили основы применения радиационной обработки в агропромышленном производстве [1]. Основным предметом этих исследований было создание технологии по радиационной стерилизации продуктов питания в целях их длительного хранения для решения вопросов обеспечения армии и населения в период вероятного применения ядерного оружия и возникновения ядерной зимы. Со временем изменилась ситуация – изменилась стратегия. Радиационные технологии рассматриваются как инструмент микробиологической безопасности продукции агропромышленного производства. Одним из перспективных научно-практических направлений является радиационная обработка растительного сырья, которая широко востребована для решения проблем дезинсекции плодов злаковых растений, удлинения сроков их хране-

ния, предпосевного облучения; обеззараживания кормов и половой стерилизации насекомых-вредителей злаковых растений; утилизация отходов сельскохозяйственного производства, получения высококачественных кормов сельскохозяйственных животных; получения модифицированных полисахаридов для медицины [2–4].

Методика исследования растительного сырья весьма затруднена из-за многокомпонентности. Для решения этой проблемы можно использовать ИК-спектроскопию, позволяющую установить конфигурацию и типы гликозидных связей, обнаружить водородные связи, различные функциональные группы и т.д. [5, 6]. Несмотря на имеющиеся в доступной научной литературе обширной базе ИК-спектров веществ однокомпонентного состава, имеется довольно скудная достоверная информация об ИК-спектрах веществ многокомпонентного состава, в том числе растительного происхождения, хотя актуальность ее наличия продиктовано необходимостью решения конкретных практических за-

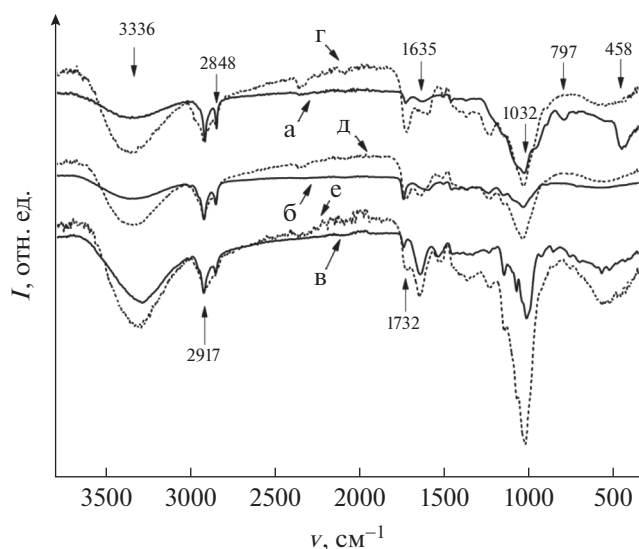


Рис. 1. ИК-Фурье спектры образцов целого зерна овса (а, г), их зерновика (б, д) и порошка (в, е). Образцы были приготовлены с использованием необлученных (а–в) и предварительно γ -облученных ЦЗ (г–е). Доза облучения 3000 кГр.

дач [7–9]. В рамках настоящей работы этот вопрос рассматривается на примере радиолиза многокомпонентного растительного сырья – зерно овса, состоящего из различных органических и неорганических веществ, причем органических веществ значительно больше.

Основная цель настоящего исследования – влияние дозы γ -облучения целых зерен овса от 100 до 3000 кГр на ИК-Фурье спектры зерен овса, их порошка и зерновика.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

В работе было использовано зерно промышленного овса из урожая 2021 г., произведенного ООО “ГОРА” (Россия) по ГОСТу 28673-90. Средний вес исследованных зерен овса составляет 35 мг. Семена овса в работе не подвергались дополнительной очистке, и они использовались в виде целых зерен (ЦЗ), порошка, полученного при измельчении ЦЗ, и зерновика, полученного путем механического удаления пленки от ЦЗ.

Измельчение

Порошок ЦЗ получали с использованием зерновой лабораторной мельницы марки ЛЗМ-1М с металлическим стаканом. Помол ЦЗ проводился при скорости вращения стального ножа – измельчителя 16500 об/мин в течение 5 мин (циклически) при комнатной температуре. В результате

был получен порошок ЦЗ с размером частиц менее 200 микрон.

Гамма-облучение

Радиолиз ЦЗ проводился на воздухе γ -лучами ^{60}Co на УНУ “Гамматок-100” ИПХФ РАН при 30°C. Особенности данной установки и возможности ее использования подробно описаны в работе [10]. Мощность дозы облучения 2.8 Гр/с. Порошки и зерновика ЦЗ, сами в отдельности, не подвергались радиационной обработке. Образцы зерновика и порошка облученных ЦЗ были изготовлены путем очищения от цветочной пленки или измельчения до порошка предварительно облученных ЦЗ соответственно.

ИК-Фурье спектроскопия

ИК-спектры исследованных образцов ЦЗ овса, их порошка и зерновика регистрировались в диапазоне частот 400–4000 см^{-1} на Фурье-спектрометре Bruker ALPHA, оснащенный приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с алмазной призмой однократного отражения (НПВО, FTIR-ATR). Условия регистрации спектров: температура 23°C, количество сканов 16.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ИК-Фурье спектры γ -облученных целых зерен овса

На рис. 1 представлен общий вид ИК-спектров образцов ЦЗ овса (а), их зерновика, полученного после очистки ЦЗ от цветочной пленки (б) и порошка измельченных ЦЗ (г). Они приведены со смещением вдоль оси ординат для удобства сравнения.

В составе ЦЗ овса основными веществами являются углеводы, вода, белки, липиды, витамины и другие соединения, по-разному распределенные в различных частях семени овса. Содержание крахмала в составе углеводов в зависимости от вида и сорта овса колеблется от 36 до 59% [11], в то же время сами углеводы составляют 65–80% состава зерна овса. Исходя из вышесказанного, анализ изменений в ИК-спектрах зерна овса проводился на предмет крахмала, как основного компонента таких зерен.

Известно [12, 13], что в ИК-Фурье спектре крахмала, как правило, проявляются пять различных частотных областей поглощения, отвечающие за колебания пиранозного кольца глюкозидного звена ($>800 \text{ см}^{-1}$), области отпечатков пальцев ($800\text{--}1550 \text{ см}^{-1}$), колебания O–H связанных молекул воды ($1550\text{--}1800 \text{ см}^{-1}$), области валентных колебаний O–H ($3000\text{--}3700 \text{ см}^{-1}$) и C–H ($2800\text{--}3000 \text{ см}^{-1}$).

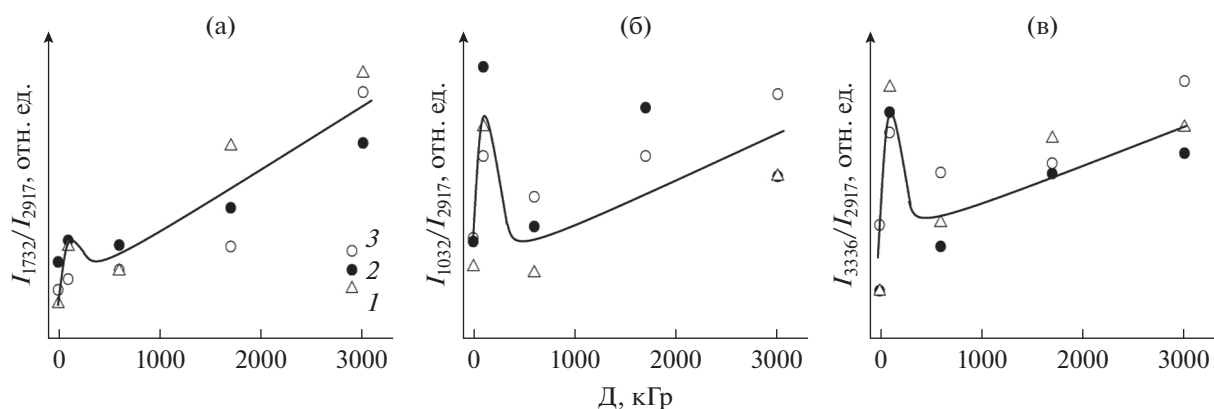


Рис. 2. Зависимость от дозы облучения ЦЗ овса интенсивности полос поглощения кислородсодержащих фрагментов С=О (а), С–О (б), О–Н (в) в образцах облученных ЦЗ (1), их зерновике (2) и порошке (3).

Анализ ИК-спектра зерна овса на рис. 1а показывает, что в нем с различной степенью интенсивности присутствуют полосы поглощения в указанных диапазонах частот (табл. 1). Наряду с этим, в составе зерна овса помимо крахмала присутствуют и другие вещества, обладающие отличительными от крахмала характеристическими частотами поглощения. В результате экспериментальные ИК-спектры зерен овса на рис. 1 дают набор диапазонов полос поглощения, характерных для гидроксилсодержащих соединений ($3670\text{--}3020\text{ см}^{-1}$), валентным ($2960\text{--}2820\text{ см}^{-1}$) и деформационным колебаниям С–Н-связей ($1460\text{--}1420\text{ см}^{-1}$), валентным колебаниям карбонильных групп ($1750\text{--}1730\text{ см}^{-1}$) и С–О-связей ($1280\text{--}1010\text{ см}^{-1}$). Полоса поглощения между 1680 см^{-1} и 1620 см^{-1} в спектре зерен овса свидетельствует о наличии в их структуре кристаллизационной воды (табл. 1).

ИК-спектр γ -облученного образца ЦЗ овса во многом идентичен спектру его необлученного аналога (рис. 1а, г). Первым отличием спектра облученных и необлученных ЦЗ является усиление интенсивности полосы поглощения при 3336 см^{-1} , связанной с валентными колебаниями гидроксильных групп относительно интенсивности полосы поглощения при 2917 см^{-1} , связанных с антисимметричными валентными колебаниями С–Н-связи. Это особенно заметно при дозах облучения до 100 кГр (рис. 2в, кривая 1). Однако при дальнейшем повышении дозы облучения значение соотношения интенсивностей этих двух полос поглощения сначала снижается при дозах облучения от 100 до 600 кГр , а затем, снова, практически линейно, растет с дозой до 3000 кГр . Видимо, в ходе облучения зерна овса, в начале, при дозах до 100 кГр происходит эффективный разрыв С–Н-связей и отрыв радиолитических атомов водорода от макромолекул овса. В свою очередь, образующиеся радиолитические атомы водорода могут отрываться

от макромолекул зерен овса следующие атомы водорода и образовывать молекулы водорода, тем самым они еще больше снижают в зернах содержание С–Н-связей. Судя по всему, связи С–Н подвергаются разрыву во всем интервале доз облучения зерен овса, т.е. наблюдается их радиационная карбонизация. Об этом свидетельствует снижение интенсивности полосы поглощения С–Н-связей в ИК-спектрах и окрашивание зерен, сначала в желтый, а потом в желто-коричневый цвет с повышением дозы облучения.

Гидроксильные группы, имеющиеся в составе спиртовых и карбоксильных фрагментов зерен овса, могут подвергаться прямому радиолитическому разрыву или атаке продуктов радиолитического разрыва, например, радиолитических атомов водорода, что приведет к снижению содержания гидроксильных групп с повышением дозы облучения зерен овса. Однако в отличие от С–Н-связей, гидроксильные группы могут также накапливаться в составе зерен овса в результате химических превращений в самих макромолекулах, вызванных радиацией, а также вследствие их радиационного окисления. Видимо, при дозах облучения от 100 до 600 кГр процесс отрыва гидроксильных фрагментов радиолитическими атомами водорода с образованием молекул воды превалирует над процессом образования гидроксилсодержащих фрагментов в процессе радиационного окисления. По этой причине с повышением дозы от 100 до 600 кГр наблюдается снижение в составе зерен содержания гидроксильных групп относительно С–Н фрагментов (рис. 1в). Возможно, по аналогичной причине в интервале доз облучения $100\text{--}600\text{ кГр}$ уменьшается относительная интенсивность полосы поглощения и других кислородсодержащих фрагментов С=О (рис. 2а, кривая 1) и С–О (рис. 2б, кривая 1). В последующем, повышение дозы облучения от 600 до 3000 кГр сопровождается ростом доли всех трех кислородсодержащих фрагментов макромолекул овса и их карбонизацией.

Таблица 1. Соотнесение полос ИК-спектра целого зерна овса, его зерновика и порошка до и после радиоллиза ^{60}Co

Экспериментальные данные				Литературные данные [8, 9, 14–16]		
Целое зерно		Зерновик		Порошок	Отнесение ^в	
Доза γ -облучения, кГр						Интервал волновых чисел ^б , ν , см^{-1}
0	3000	0	3000	0	3000	
Волновые числа ^а , см^{-1}						
3336 о.с.	3353 о.с.	3330 о.с.	3300 о.с.	3287 о.с.	3359–3287	$\nu(\text{O}-\text{H})$
3009 о.о.сл.	3009 сл.	3008 сл.	3008 о.сл.	3009 о.о.сл.	3013–3005	$\nu(\text{C}-\text{H})$ $\nu(=\text{CR}-\text{H})$
2981 о.о.сл.	2981 сл.	—	2981 о.сл.	—	2981–2980	$\nu(\text{O}-\text{H})$
2952 пл.	2952 пл.	2952 пл.	2952 пл.	—	2952	$\nu_{\text{as}}(\text{CH}_3)$
2917 о.с.	2924 о.с.	2925 о.с.	2925 о.с.	2923 о.с.	2926–2916	$\nu_{\text{as}}(\text{CH}_2)$
2876 о.о.сл.	2876 о.о.сл.	2873 о.о.сл.	2873 о.о.сл.	2873 о.о.сл.	2913	$\nu_s(\text{CH}_3)$
2848 о.с.	2856.сл	2853 с.	2853 ср.	2853 сл.	2877–2873	$\nu_s(\text{CH}_2)$
—	2359 ср.	—	—	2357 сл.	2856–2848	$\nu_{\text{as}}(=\text{C}=\text{C})$
—	2325 о.сл	—	—	—	2364–2357	2349,3
—	2096.сл.	—	—	—	2326–2325	2150
—	1944 о.сл.	—	—	—	2096	1970–1950
1732 ср.	1734 с.	1745 с.	1729 ср.	1744 ср.	1944	1750–1730
1635 ср.	1635 пл.	1635 пл.	1714 пл.	1720 сл.	1720–1745	$\delta(\text{H}_2\text{O})$
1635 ср.	1635 пл.	1635 пл.	1648 ср.	1652 сл.	1720–1745	$\nu(\text{C}=\text{C})$
—	1600 пл.	—	—	—	1653–1635	$\nu(-\text{HC}=\text{CH}-)$, ароматическое ядро
—	—	1540 пл.	1540 сл.	1540 ср.	1653–1635	$\nu_{\text{as}}(\text{C}-\text{O})$, карбоновые кислоты
1463 ср.	1463 ср.	1462 ср.	1462 ср.	1455 ср.	1601–1600	$\delta_s(\text{CH}_2)$
					1544–1537	
					1463–1454	

Таблица 1. Окончание

Экспериментальные данные				Литературные данные [8, 9, 14–16]		
Целое зерно	Тип			Интервал волновых чисел ^б , ν , см^{-1}	Диапазон частот полос поглощения, см^{-1}	Отнесение ^в
	Зерновик	Порошок				
		Доза γ -облучения, кГр				
0	3000	0	3000	0	3000	
Волновые числа ^а , см^{-1}						
1373 о.сл.	1417 о.о.сл.	1417 о.о.сл.	1417 о.о.сл.	1370 о.сл.	1370 сл.	$\delta_{\text{ас}}(\text{CH}_3)$
1238 пл.	1376 о.о.сл.	1376 о.о.сл.	1376 о.о.сл.	1238 сл.	1238 ср.	$\delta_{\text{с}}(\text{CH}_3)$
1151 пл.	1243 ср.	1241	1151 ср.	1151 ср.	1151 с.	$\nu(\text{C}-\text{O})$, спирты
—	1158 пл.	1151 пл.	1102 пл.	1102 пл.	1102 пл.	$\nu(\text{C}-\text{O})$, спирты вторичные
—	1102 пл.	1102 пл.	1078 пл.	1078 ср.	1078 ср.	
1076 пл.	1078 пл.	1078 пл.	1043 ср.	1043 пл.	1043 пл.	$\nu(\text{C}-\text{O})$, спирты первичные
1032 о.с.	1038 ср.	1043 ср.	1018 ср.	1018 ср.	1027 ср.	$\nu(\text{C}-\text{O})$, спирты первичные
—	—	—	990 пл.	992 пл.	992 пл.	$\nu(\text{C}-\text{O})$, спирты вторичные
992 пл.	990 пл.	990 пл.	932 о.сл.	934 о.сл.	934 о.сл.	пиранозные кольца
895 пл.	895 пл.	895 пл.	—	—	—	
797 сл.	—	—	763 о.сл.	759 сл.	761 о.сл.	$-(\text{CH}_2)_4$ -скелетные
—	—	—	720 о.о.сл.	706 сл.	706 сл.	
—	—	—	572 о.сл.	574 сл.	574 о.о.сл.	$\text{C}-\text{C}-\text{C}$
—	—	—	483 о.о.сл.	483 о.о.сл.	483 о.о.сл.	$\delta(\text{C}-\text{O})$

^а — интенсивность полосы: о.с. — очень сильная, с. — сильная, ср. — средняя, сл. — слабая, о.сл. — очень слабая, о.о.сл. — очень, очень слабая; ^б — диапазон волновых чисел на экспериментальных спектрах образцов до и после облучения в интервале доз 100–3000 кГр; ^в — ν — валентное колебание ($\nu_{\text{с}}$ — симметричное, $\nu_{\text{ас}}$ — антисимметричное), δ — деформационное колебание ($\delta_{\text{с}}$ — симметричное, $\delta_{\text{ас}}$ — антисимметричное).

Сведение о повышении содержания окисленных групп с увеличением дозы облучения крахмала от 110 до 440 кГр и о доле карбоксильных групп значительно превышающей доли карбонильных, было сообщено в работе [17], тогда как по данным авторов работы [18] при γ -облучении кукурузного крахмала теми же дозами преобладают кетогруппы.

Еще одной особенностью ИК-спектра γ -облученного ЦЗ овса является появление и рост с дозой облучения слабых полос поглощения при 2359, 2325, 2096 и 1944 см^{-1} (рис. 1г). Эти полосы связаны с валентными колебаниями кумулированных двойных связей $=\text{C}=\text{C}$, накапливающихся с дозой облучения в составе ЦЗ в результате глубоких радиационно-химических процессов.

ИК-Фурье спектры зерновика и порошка γ -облученных целых зерен овса

В силу особенности метода НПВО (исследуемая толщина не более 1 мкм), ИК-Фурье спектр ЦЗ овса представляет поверхность цветочной пленки, покрывающей зерновик. Поверхность ЦЗ, очищенная от цветочной пленки, отображает поверхность зерновика, а спектр размолотого в порошок ЦЗ отображает собой комбинацию, в которой состав всех компонентов ЦЗ овса является более однородным во всей смеси.

Как видно из рис. 1, в спектрах зерновика (рис. 1б) и порошка ЦЗ (рис. 1в) имеются полосы поглощения, сходные с областями полос поглощения самого ЦЗ (рис. 1а) по положению, но различающиеся своей интенсивностью. При сравнительном их анализе выявлены следующие особенности:

(i) в спектре порошка максимум пика поглощения валентных колебаний гидроксильных групп сдвигается в длинноволновую область и регистрируется при $\nu = 3287 \text{ см}^{-1}$. Аналогичные пики поглощения в спектрах ЦЗ и зерновика проявляются в области $\nu = 3333 \pm 3 \text{ см}^{-1}$. Такой сдвиг свидетельствует о меньшей структурированности водородных связей в образце порошка, чем в ЦЗ и в зерновике. Очевидно, в процессе измельчения ЦЗ до порошка происходит частичное разрушение структуры сеток водородных связей. Согласно [8, 19–21], полосы поглощения в области 3400–3200 см^{-1} характеризуют наличие гидроксильных групп в межмолекулярных водородных связях. По всей вероятности, в образцах овса водородные связи образуются между кислородом гидроксильного фрагмента одной молекулы и водородом гидроксила другой. Очевидно, чем слабее такое взаимодействие, тем выше частота колебаний гидроксильных групп, что и наблюдается в ИК-спектре порошка зерен овса;

(ii) в ИК-спектрах порошка и зерновика ЦЗ пики полос поглощения асимметричных ($2924 \pm 1 \text{ см}^{-1}$) и симметричных валентных колебаний

$\text{C}-\text{H}$ связей (2853 см^{-1}) сдвигаются в коротковолновую область всего лишь на 7 см^{-1} относительно таковых в спектре ЦЗ;

(iii) в ИК-спектрах зерновика и порошка овса отмечаются пики 1540 см^{-1} , связанные с валентными колебаниями $\text{C}-\text{O}$ -связей карбоксильных групп, и плечо около 1102 см^{-1} , относящееся к валентным колебаниям $\text{C}-\text{O}$ -связей вторичных спиртов;

(iv) слабые пики при 761 и 706 см^{-1} , характерные для скелетных колебаний $(-\text{CH}_2-)_x$ и регистрирующиеся в спектре порошка, свидетельствуют о наличии веществ с фрагментами линейных алканов. Слабые полосы поглощения при 574 см^{-1} , которые соответствуют колебаниям цепочки $\text{C}-\text{C}-\text{C}...$ -связей [20, 21], обнаруживаются в облученном зерновике и порошке ЦЗ. Это значит, что углеводородные цепочки в их макромолекулах получают свободу движений после изменения пространственной организации молекул. В случае радиолитического разложения макромолекул крахмала, в местах слабых взаимодействий, удерживающих цепь, структура спирали макромолекул крахмала трансформируется в развернутую форму.

В целом, ИК-спектры порошка (рис. 1е) и зерновика (рис. 1д) γ -облученного ЦЗ мало отличаются от спектров облученных ЦЗ в качественном отношении (рис. 1е, г). Но при этом, в спектрах зерновика и порошка, кроме усиления интенсивности всех полос относительно интенсивности полос поглощения $\text{C}-\text{H}$ -связей, также наблюдается появление и усиление с дозой облучения изолированных двойных связей $\text{C}=\text{C}$ в области $1680-1620 \text{ см}^{-1}$. На рис. 2 представлены зависимости от дозы облучения относительной интенсивности полос поглощения кислородсодержащих фрагментов $\text{C}=\text{O}$ (а), $\text{C}-\text{O}$ (б) и $\text{O}-\text{H}$ (в) в ИК-спектрах образцов порошка (3) и зерновика (2) облученного ЦЗ. Видно, что с повышением дозы γ -облучения наблюдается усиление относительной интенсивности полос поглощения кислородсодержащих фрагментов $\text{C}=\text{O}$ и $\text{C}-\text{O}$.

Судя по всему, кумулированные двойные связи $=\text{C}=\text{C}$ образуются и накапливаются на цветочной пленке радиолитованного ЦЗ, и они в процессе измельчения переходят в состав порошка облученного ЦЗ. Поэтому, в ИК-спектрах порошка и ЦЗ при 2359, 2325, 2096 и 1944 см^{-1} регистрируются полосы поглощения валентных колебаний кумулированных двойных связей.

В спектре порошка, полученного при измельчении облученного ЦЗ (рис. 1в) отмечается сильное поглощение в области $1200-900 \text{ см}^{-1}$ с четко выраженными максимумами при 1151; 1078, 1018 см^{-1} совместно с размыто выраженными несколькими линиями, проявляющимися в виде плеч при 1102 и 1043 см^{-1} . Они свидетельствуют о присутствии в

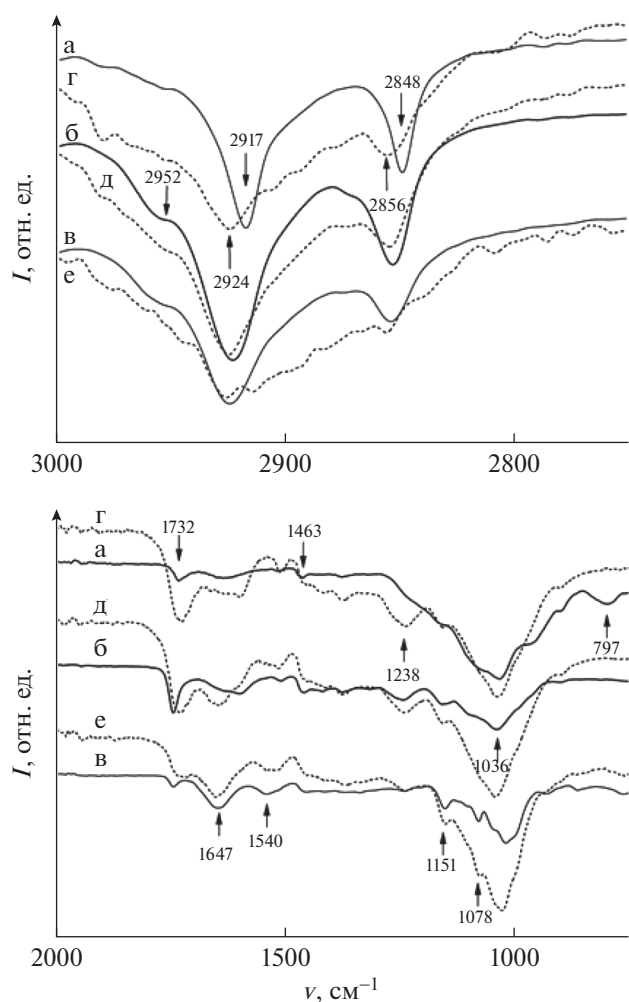


Рис. 3. Расширенные ИК-Фурье спектры образцов целого зерна овса (а, г), их зерновика (б, д) и порошка (в, е). Образцы были приготовлены с использованием необлученных (а–в) и γ -облученных ЦЗ овса (г–е). Доза облучения 3000 кГр.

ЦЗ характеристических полос ИК-спектров пиранозного кольца и симметрических и асимметрических колебаний валентных связей С–О в спиртах [8, 9].

В отличие от спектра порошка, в спектрах образцов необлученных и облученных ЦЗ (рис. 3а, г) и их зерновиков (рис. 3б, д), такие полосы имеют сильно размытый характер. Вследствие этого, полосы с пиками при 1018 и 1078 см^{-1} , четко выделяющиеся в спектре порошка, в спектрах ЦЗ и зерновика регистрируются как плечи.

Несмотря на то, что γ -облучение приводит к существенным изменениям в ИК-спектрах облученных зерен овса, повышаются относительные интенсивности полос поглощения, связанные с колебаниями С=О, С–О–С и О–Н-связей, появляются полосы поглощения ненасыщенных связей; в спектре облученного овса сохраняются

свойственные зерну овса полосы поглощения в ИК области, т.е. воздействие γ -излучения дозой до 3000 кГр не приводит к полному разрушению химических связей в структуре соединений, содержащихся в зернах овса. Однако визуально можно заметить, что при более высоких дозах облучения (1700–3000 кГр) зерна овса теряют первичную твердость и пленчатость, нарушается сплошность поверхности зерновика и ЦЗ, хотя при дозах до 600 кГр они остаются практически не поврежденными.

Следует отметить, что в результате накопления в структуре зерен овса различных хромофорных групп (С=C, С=О) и ауксохромной группы ОН, вызывающей более глубокую интенсивность цвета, первоначальный соломенно-желтый цвет необлученных ЦЗ овса в ходе радиолитического процесса постепенно переходит в светло-коричневый, а затем в темно-коричневый с повышением дозы облучения. Изменение цвета также связано с радиационной карбонизацией макромолекул зерен овса.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- γ -облучение приводит к существенным изменениям в ИК-спектрах облученных целых зерен овса, зерновика, полученного при очищении облученного целого зерна от цветочной пленки, и порошка размолотых целых зерен;

- при облучении целых зерен овса γ -лучами в ИК-спектре наблюдается повышение интенсивности полос поглощения связей С=О, С–О–С, О–Н и снижение интенсивности полос С–Н-связей, что свидетельствует о карбонизации макромолекул веществ, составляющих зерна овса и их радиационное окисление;

- анализ спектров облученных целых зерен овса, зерновика, полученного при очищении облученного целого зерна от цветочной пленки, и порошка размолотых облученных целых зерен показывает, что в них сохраняются свойства зерну овса полосы поглощения в ИК области. Таким образом, показано, что γ -радиолитическая дозой до 3000 кГр не приводит к полному разрушению химических связей в структуре соединений, содержащихся в целых зернах овса;

- внешний вид зерновика, цветочной пленки и целого зерна овса зависит от дозы γ -облучения. При дозах облучения до 600 кГр они остаются практически не поврежденными. Однако при дозах облучения 1700–3000 кГр в зернах овса теряются первичная твердость, пленчатость и нарушается сплошность поверхности;

- в ИК-спектрах порошка и ЦЗ регистрируются полосы поглощения валентных колебаний кумулированных двойных связей, накапливающих

ся с дозой облучения в результате глубоких радиационно-химических процессов на цветочной пленке радиолитованного ЦЗ. Они в процессе измельчения переходят в состав порошка, облученного ЦЗ;

- первоначальный соломенно-желтый цвет целых зерен овса с повышением дозы облучения от 100 до 3000 кГр постепенно меняется сначала на светло-коричневый, а затем на темно-коричневый в результате накопления в структуре зерен различных хромофорных групп (C=C, C=O), а также ауксохромной группы ОН, усиливающей действия хромофорных групп. Такое изменение цвета зерен овса с повышением дозы γ -облучения овса связано с радиационной карбонизацией и окислением макромолекул зерен.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Государственно-го задания АААА-А19-119041090087-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Farkas J., Mohacsi-Farkas C.* // Trends in Food Science & Technology. 2011. V. 22. № 2–3. P. 121.
2. *Шарпатов В. А.* Радиационная химия биополимеров. М.: Геос, 2008. 249 С.
3. *Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И.* Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск-Москва: ООО Информполиграф, 2015. 400 С.
4. *Удалова А.А., Гераськин С.А., Дубынина М.А.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. С. 517.
5. *Смит А.* Прикладная ИК-спектроскопия: Основы, техника, аналит. применение / под ред. А.А. Мальцева. М.: Мир, 1982. 328 с.
6. *Васильев А.В., Гриненко Е.В., Шукин А.О., Федюлина Т.Г.* Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений: Учебное пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2007. 54 с. <https://spbftu.ru/wp-content/uploads/2017/03/PosobIRshort.pdf>. (дата обращения: 01.05.2022).
7. *Голубцова Ю.В.* // Техника и технология пищевых производств. 2017. Т. 45. № 2. С. 126.
8. *Тринева О.В., Рудая М.А., Гудкова А.А., Сливкин А.И.* // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. С. 187.
9. *Седакова В.А., Громова Е.С.* // Вестник фармации. 2011. С. 17.
10. *Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Аллаяров С.Р., Бадамшина Э.Р.* // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. С. 224.
11. <https://agro-portal.su/oves/2607-himicheskiy-sostav-zerna-ovsa.html> (дата обращения: 22.05.2022).
12. *Brasoveanu M., Nemtanu M.R.* Aspects on Starches Modified by Ionizing Radiation Processing. // Applications of Modified Starches / edit. E. Flores Huicochea, R. Rendon. Chapter 5. London: IntechOpen, 2017. P. 49.
13. *Kizil R, Irudayaraj J., Seetharaman K.J.* // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2002. V. 50. P. 3912.
14. https://studopedia.ru/12_134476_deformatsionnie-kolebaniya-svyazi-s-n-alkilnih-fragmentov.html (дата обращения: 22.05.2022).
15. *Тарасевич Б.Н.* ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. Химический факультет МГУ: Москва, 2012. 54 с.
16. *Манк В.В., Мельник О.П., Трачевский В.В.* // Химия и технология воды. 2011. Т. 33. С. 666.
17. *Литвяк В.В., Батян А.Н., Кравченко В.А.* // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. С. 62.
18. *Коротченко К.А., Шарпатов В.А.* // Химия высоких энергий. 1993. Т. 27. С. 50.
19. *Пиментел Д.К., Мак-Клеллан О.Л.* Водородная связь / Перевод с англ. М. О. Буланина, Г.С. Денисова, Д.Н. Щепкина Под ред. В. М. Чулановского. М.: Мир, 1964. 462 С.
20. *Наканиси К.* Инфракрасная спектроскопия и строение органических соединений. М.: Мир, 1965. 216 с.
21. *Рощина Е.В., Суконкина Е.Б., Литвяк В.В., Петюшев Н.Н., Москва В.В.* // Хранение и переработка сельхозсырья. 2009. С. 56.