

ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОЛЬШОЙ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СОСТАВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ

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

^а Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
и Российской академии наук, Черногловка, 142432 Россия

^б Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, 127434 Россия

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

Поступила в редакцию 01.02.2023 г.

После доработки 14.03.2023 г.

Принята к публикации 15.03.2023 г.

В статье рассматриваются физико-химические изменения состава гамма-облученных клубней картофеля вплоть до доз 5000 кГр методом ИК-Фурье спектроскопии. Изучены функциональные группы в порошках кожуры, мякоти и сока облученных клубней. Установлена карбонизация молекул веществ, составляющих клубень и их радиационное окисление. При дозах свыше 1000 кГр происходит полная потеря твердости клубней, нарушается целостность поверхности кожуры и начинается интенсивное выделение сока. Показано, что γ -радиолиз дозой до 5000 кГр не приводит к полному разрушению химических связей в структуре основных соединений, содержащихся в клубнях картофеля.

Ключевые слова: гамма-облучение клубней картофеля, ИК-Фурье спектроскопия, порошки кожуры, мякоти и сока картофеля

DOI: 10.31857/S0023119323040083, **EDN:** QNRNLH

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, проводившиеся в области радиационного облучения картофеля, в основном, направлены на изучение использования небольших доз радиации в качестве метода подавления прорастания картофеля при хранении (50–250 Гр [1–3]) или его стерилизации (до 10 кГр [4]). Методически исследование растительного сырья весьма осложнено из-за многокомпонентности его химического состава. В настоящем сообщении этот вопрос рассматривается на примере радиолиза многокомпонентного растительного сырья — клубней картофеля, состоящих из различных органических и неорганических веществ. Для решения этой задачи использована ИК-Фурье спектроскопия, позволяющая обнаружить водородные связи, различные функциональные группы и т.д. [5, 6].

Целью настоящего исследования было изучение ИК-Фурье спектров мякоти, кожуры и сока γ -облученных клубней картофеля.

что в составе исследуемых клубней картофеля на долю воды приходится 74%, сухое вещество составляет около 26%, в том числе крахмала 10–12%.

Для проведения ИК-Фурье исследования исходные и γ -облученные клубни картофеля были очищены от кожуры, затем полученные мякоть клубней и кожура были высушены при комнатных условиях (24–27°C, атмосферное давление, влажность ~50%). Полученные после сушки остатки кожуры и мякоти были измельчены до порошка. В ходе радиолиза из клубней картофеля выделялся сок, эффективное выделение которого происходило при дозах свыше 1000 кГр. Для исследования полученный из картофеля сок был предварительно высушен при комнатных условиях до постоянного веса, а затем образовавшийся сухой остаток измельчен до порошка.

Таким образом, в экспериментах были использованы порошки мякоти, кожуры и сока γ -облученных клубней картофеля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Для исследования был выбран сорт картофеля Российской селекции Метеор. Анализ показал,

Гамма-облучение

Гамма-облучение клубней картофеля проводилось γ -лучами Co^{60} на УНУ “Гамматок-100” ФИЦ ПХФ и МХ РАН при мощности дозы облу-

чения 3.6 Гр/с. Особенности данной установки и возможности ее использования подробно описаны в работе [7].

Измельчение

Порошки сухих остатков мякоти, кожуры и сока картофеля регистрировались в диапазоне частот 350–4000 см^{-1} на Фурье-спектрометре Bruker ALPNA, оснащенный приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с алмазной призмой однократного отражения (НПВО, FTIR-ATR).

ИК-Фурье спектроскопия

ИК-спектры порошка мякоти, кожуры и сока картофеля регистрировались в диапазоне частот 350–4000 см^{-1} на Фурье-спектрометре Bruker ALPNA, оснащенный приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с алмазной призмой однократного отражения (НПВО, FTIR-ATR).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ИК-Фурье спектры порошка мякоти γ -облученных клубней картофеля

Общий вид ИК-спектров порошка мякоти клубней картофеля, облученных различной дозой γ -излучения, представлены на рис. 1 и 2 со смещением вдоль оси ординат для удобства сравнения.

Широкая и интенсивная полоса в области 3690–3020 см^{-1} с центром при 3286 см^{-1} , регистрируемая в спектрах порошка мякоти не облученных клубней картофеля (спектры *a* на рис. 1 и 2) обусловлена валентными колебаниями гидроксильных групп, вовлеченных в межмолекулярные и внутримолекулярные водородные связи [8, 9], малозаметный дублет отвечает асимметричным (2982 см^{-1}) и симметричным (2887 см^{-1}) валентным колебаниям С–Н связей метиленовых и метинных групп [10], а полоса поглощения около 1700–1500 см^{-1} с максимумом при 1642 см^{-1} , относится к деформационным колебаниям адсорбированной кристаллизованной воды [11, 12].

В данном спектре также отмечаются полосы поглощения с несколькими интенсивными максимумами при 1150, 1076, 996 см^{-1} , и слабыми сигналами при 930, 860, 761, 707, 575 см^{-1} совместно с нечетко выраженными несколькими линиями, проявляющимися в виде плеч полос поглощения при 1596, 1235, 1099 см^{-1} (табл. 1).

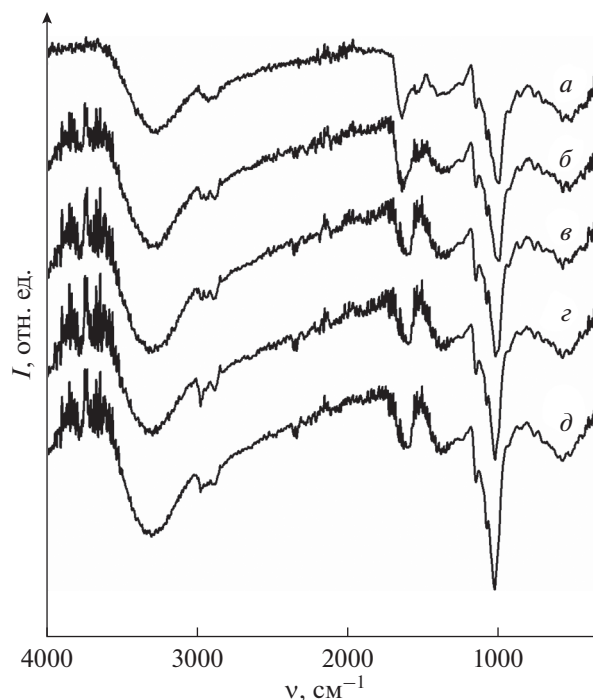


Рис. 1. ИК-Фурье спектры порошков мякоти не облученных (*a*) и γ -облученных клубней картофеля (*b*, *c*, *d*). Доза γ -облучения (кГр): 100 (*b*), 400 (*c*), 1000 (*d*), 2000 (*e*) кГр.

Регистрируемые в частотной области 1150–850 см^{-1} полосы поглощения, в целом, являются последствием сочетания валентных колебаний связей С–О, С–С и О–Н [24] среди которых полоса поглощения при 1150 см^{-1} связана с асимметричными валентными колебаниями гликозидной связи β -C₁–O–C₄ [25] и пик при 930 см^{-1} обусловлен скелетными колебаниями гликозидной связи α -C₁–O–C₄. Валентные и деформационные колебания связей С–О–Н в рассматриваемом спектре проявляются в области поглощения при 1076 см^{-1} [25].

Большинство вышеуказанных полос ИК-спектра порошка мякоти картофеля, перечисленных в табл. 1, находятся в диапазонах частот, приведенных в литературе для ИК-Фурье спектра крахмала [18, 19]. Этого и следовало ожидать, поскольку крахмал составляет более 40% состава сухих веществ исследованных клубней картофеля.

ИК-Фурье спектры измельченного порошка мякоти γ -облученного различной дозой картофеля в качественном плане во многом идентичны со спектром порошка мякоти необлученных клубней картофеля (рис. 1 и 2). Тем не менее, в результате γ -облучения в ИК-спектре мякоти происходит изменение интенсивности полос поглощения (3286, 1642, 996 см^{-1}) и возникают новые полосы

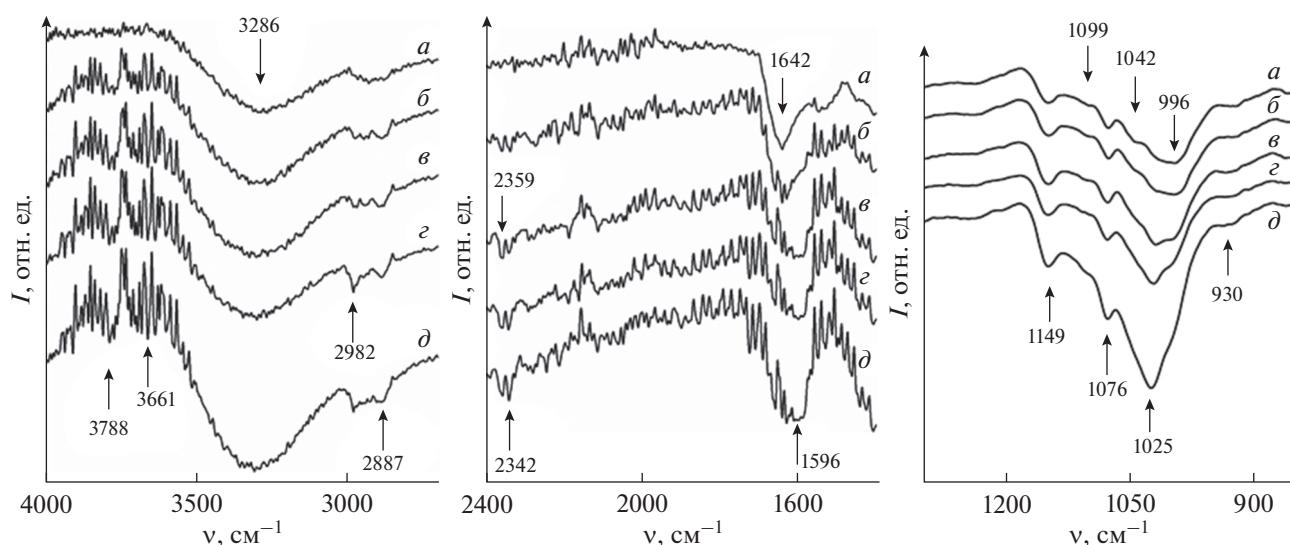


Рис. 2. Расширенные ИК-Фурье спектры порошков мякоти не облученных (*а*) и γ -облученных клубней картофеля (*б, в, г, д*). Доза γ -облучения (кГр): 100 (*б*), 400 (*в*), 1000 (*г*), 2000 (*д*) кГр.

поглощения ($3788, 3661, 2359, 2342, 1022 \text{ см}^{-1}$) (табл. 1).

В области валентных колебаний гидроксильных групп в спектре порошка мякоти γ -облученных клубней кроме широкой полосы с центром при 3286 см^{-1} регистрируются еще две полосы поглощения с максимумами при 3788 и 3661 см^{-1} . Появление полос при 3788 и 3661 см^{-1} связано с освобождением гидроксильных групп от водородных связей и смещением полос поглощения О—Н-связей в высокочастотную область, характерную для свободных гидроксильных групп. Поскольку, водородные связи, изменяя силовую постоянную О—Н-связи, приводят к уменьшению частоты ее колебания, поэтому участие гидроксильных групп в образовании водородных связей приводит к смещению полосы их поглощения в низкочастотную область (полоса при 3286 см^{-1}), а освобождение гидроксильных групп от водородных связей смещает полосу поглощения, наоборот, в высокочастотную область (полосы при 3788 и 3661 см^{-1}).

Таким образом, появление полос при 3788 и 3661 см^{-1} в спектре порошка мякоти является результатом разрушения водородных связей с участием гидроксильных групп в результате γ -облучения.

Еще одним отличием спектра мякоти облученных клубней от спектра мякоти не облученных клубней является появление слабых полос при 2359 и 2342 см^{-1} , связанных с валентными колебаниями кумулированных двойных связей $\text{C}=\text{C}$ (рис. 2, спектры *б–д*). Регистрирующиеся в спектре мякоти слабые пики при 764 и 699 см^{-1} характерны для скелетных колебаний $(-\text{CH}_2-)_x$ и они свидетельствуют о наличии веществ с фрагментами линейных алканов. Практическая неизмен-

ность относительной интенсивности этих полос поглощения от дозы облучения свидетельствует об устойчивости таких фрагментов макромолекул картофеля к воздействию радиации. Сигналы полос поглощения С—Н-связей в спектрах порошка мякоти при 2982 и 2887 см^{-1} , связанные с соответствующими симметричными и асимметричными валентными колебаниями, проявляются с очень малой интенсивностью. Это особенно заметно в ИК-спектре порошка мякоти не облученного картофеля (рис. 1 и 2, спектр *а*).

Для оценки по ИК-спектрам влияния дозы облучения на состав функциональных групп порошка мякоти, в качестве тестовых были выбраны следующие полосы поглощения: широкая полоса поглощения связанных гидроксильных групп с максимумом при 3286 см^{-1} , полоса поглощения адсорбированных молекул воды с центром при 1642 см^{-1} и полоса поглощения сочетания валентных колебаний связей С—О и О—Н, а также деформационных и валентных колебаний глюкозидной связи С—О—С с центром при 996 см^{-1} . Результаты сравнительного анализа интенсивности этих полос поглощения в зависимости от дозы облучения приведены на рис. 3. Видно, что с повышением дозы облучения наблюдается практически линейное с дозой снижение интенсивности полосы поглощения связанных гидроксильных групп при 3286 см^{-1} (кривая *а*, рис. 3). Видимо, в ходе радиолитического процесса разрушения и отрыва гидроксильных фрагментов преобладает над процессом их образования, что приводит к уменьшению в составе мякоти картофеля содержания гидроксильных групп. Снижение с дозой облучения наблюдается и в зависимости относительной интенсивности полосы поглощения при 1642 см^{-1} ,

Таблица 1. Соотношение полос ИК-спектра порошка мякоти и кожицы облученных клубней картофеля, а также порошка сока, полученного после сушки сока, выделявшегося в ходе радиоллиза клубней

Экспериментальные данные										Литературные данные	
Доза γ -облучения, кГр										диапазон частот, см ⁻¹	отнесение ^в
0	100	1000	2000	10	1000	1000	4000				
волновые числа ^а , см ⁻¹											
мякоть					кожура			сок			
—	3788 сл.	3788 ср.	3788 сл.	3788 ср.	3788 ср.	3788 ср.	—	—			
—	3661 сл.	3661 ср.	3661 сл.	3661 ср.	3661 ср.	3661 ср.	—	—			
3286 о.с.	3286 о.с.	3286 о.с.	3286 о.с.	3286 о.с.	3286 о.с.	3286 о.с.	3286 о.с.	3286 о.с.	3400—3200 [13]	$\nu(\text{O}—\text{H})$	
2982 о.сл.	2982 сл.	2982 сл.	2982 ср	2982 сл.	2982 сл.	2982 сл.	—	—	2981—2980 [14]	$\nu_{\text{ас}}(\text{CH}_2)$	
2887 о.сл.	2887 о.сл.	2887 о.сл.	2887 сл.	2887 о.сл.	2887 о.сл.	2887 о.сл.	2887 о.о.сл.	2887 о.о.сл.	2863—2843 [13]	$\nu_{\text{s}}(\text{CH}_2)$	
—	2359 о.о.сл.	2359 сл.	2359 сл.	2359 сл.	2359 сл.	2359 сл.	—	2359 о.о.сл.	2349.3 [15]	$\nu_{\text{ас}}(=\text{C}=\text{C})$	
—	2342 о.о.сл.	2342 о.сл.	2342 сл.	2342 о. сл.	2325 о.о.сл.	2325 о.о.сл.	2325 о.о.сл.	2325 о.о.сл.	2349.3 [15]	$\nu_{\text{ас}}(=\text{C}=\text{C})$	
							1715 сл.	1715 сл.		$\nu(\text{C}=\text{O})$	
1642 о.с.	1642 пл.	1642 пл.	1642 пл.	1642 пл.	1642 пл.	1642 пл.	1642 пл.	1642 пл.	1642 [16, 17]	$\delta(\text{H}_2\text{O})$	
1596 пл.	1596 пл.	1596 ср.	1596 ср.	1596 ср.	1596 ср.	1596 ср.	1596 ср.	1596 ср.	1550—1800 [18, 19]		
1406 о.сл.	1406 о.сл.	1406 о.сл.	1406 о.сл.	1406 о.сл.	1406 о.сл.	1406 о.сл.	1406 сл.	1406 сл.			
							1363 сл.	1363 сл.			
1235 пл.	1235 пл.	1235 пл.	1235 пл.	1235 пл.	1235 пл.	1235 пл.	1235 пл.	1235 пл.	1223—1272 [20]	$\nu(\text{C}—\text{O}—\text{C})$	
1150 ср.	1150 ср.	1150 ср.	1150 ср.	1150 ср.	1150 ср.	1150 ср.	1150 ср.	1150 ср.	1143—1146 [20]	$\nu(\text{C}—\text{O}—\text{C})$	
1099 пл.	1099 пл.	1099 пл.	1099 пл.	1099 пл.	1099 пл.	1099 пл.	1099 пл.	1099 пл.	1094 [21]	$\delta(\text{C}—\text{O}—\text{H})$	
1076 ср.	1076 ср.	1076 ср.	1076 ср.	1076 ср.	1076 ср.	1076 ср.	1076 ср.	1076 ср.	1078—1080 [20]	$\nu, \delta(\text{C}—\text{OH})$	
1042 ср.	1042 ср.	—	—	1042 пл.	—	—	—	—	1047 [22]	$\delta(\text{C}—\text{O}—\text{H})$	
—	1022 пл.	1022 ср.	1025 ср.	1022 пл.	1022 ср.	1022 ср.	1020 о.с.	1020 о.с.	1018 [22]	$\delta(\text{C}—\text{O}—\text{H})$	
996 ср.	996 сл.	—	—	1003 пл.	1003 пл.	1003 пл.	1001 пл.	1001 пл.	1075—1000	$\nu(\text{C}—\text{O}—\text{H})$	
930 сл.	930 сл.	930 сл.	930 сл.	930 сл.	930 сл.	930 сл.	930 сл.	930 о.сл.	930 [16, 21]	$\gamma(\text{C}—\text{O}—\text{C})$	
860 сл.	860 сл.	860 о.сл.	860 о.сл.	860 о.сл.	860 о.сл.	860 о.сл.	860 сл.	860 о.сл.	860 [21]	$\delta(\text{C}(1)—\text{H}), \delta(\text{CH}_2)$	
761 сл.	761 сл.	761 о.сл.	761 о.сл.	764 сл.	764 сл.	764 сл.	764 сл.	764 сл.	764 [21]	$\nu(\text{C}—\text{C})$	
707 сл.	707 сл.	707 сл.	707 сл.	699 сл.	699 сл.	699 сл.	699 сл.	699 сл.	745—705 [13]	$(\text{CH}_2)_4$	
575 сл.	575 сл.	575 о.о.сл.	575 о.о.сл.	573 о.сл.	573 о.сл.	573 о.сл.	573 сл.	573 сл.	575 [23]	$\text{C}—\text{C}—\text{C}$	

^а — интенсивность полос: о.с. — очень сильная, с. — сильная, ср. — средняя, сл. — слабая, о.сл. — очень слабая, о.о.сл. — очень очень слабая;

^б — ν — валентное колебание (ν_s — симметричное, $\nu_{\text{ас}}$ — асимметричное), δ — деформационное колебание.

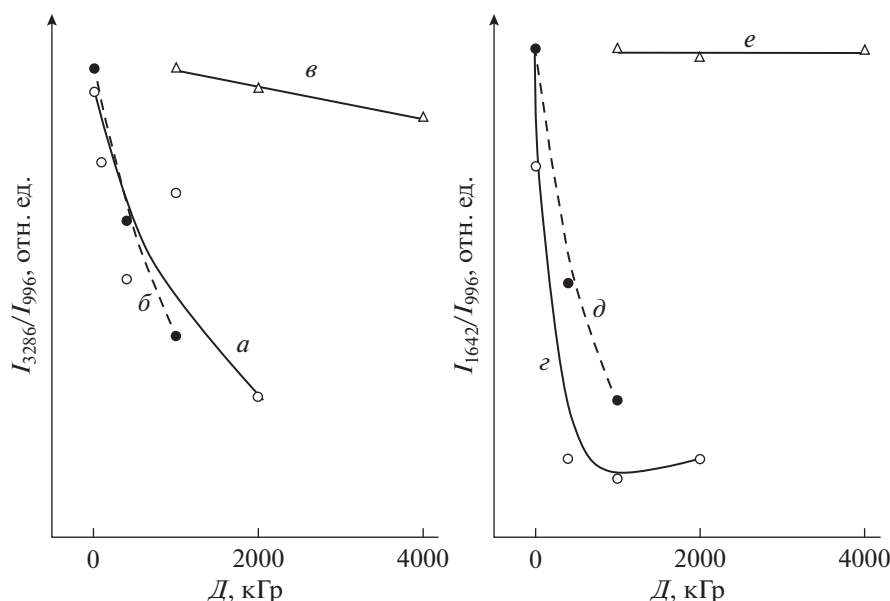


Рис. 3. Зависимость от дозы γ -облучения картофеля интенсивностей полос поглощения при 3286 см^{-1} (а, б, в) и 1642 см^{-1} (з, д, е), относительно интенсивности полосы поглощения при 996 см^{-1} в образцах мякоти (а, з), кожуры (б, д) и сока (в, е) облученных клубней картофеля.

связанной с деформационными колебаниями гидратированных молекул воды (рис. 3, кривая з). Это, скорее всего, связано с обезвоживанием клубней картофеля в процессе облучения.

В спектре порошка мякоти облученных клубней, помимо пика при 1076 см^{-1} , связанного с колебаниями связей гидроксильных групп, также проявляется пик при 1022 см^{-1} , связанный с деформационными колебаниями данных функциональных групп [22].

Известно [26], что полосы поглощения крахмала являются чувствительными к его структурной кристалличности (1042 см^{-1}) и аморфности (1022 см^{-1}). Поэтому по соотношению их интенсивности I_{1042}/I_{1022} можно судить о кристалличности крахмала или крахмалсодержащего продукта. Однако в спектре порошка мякоти необлученных клубней пик при 1022 см^{-1} не проявляется из-за наложения широкого пика при 996 см^{-1} . Хотя увеличение дозы облучения картофеля сопровождается усилением в спектре порошка мякоти интенсивности пика 1022 см^{-1} . В результате чего, после дозы облучения 100 кГр он проявляется как плечо, а при дозах облучения 1000 кГр и выше он приобретает вид острого пика. К сожалению, повышение дозы облучения приводит к постепенному исчезновению пика при 1042 см^{-1} . Эти взаимоисключающие факторы не позволили однозначно количественно определить соотношения интенсивности пиков I_{1042}/I_{1022} , следовательно, и выявить степень влияния дозы облучения на кристалличность крахмала в составе порошка мякоти облученных клубней.

Увеличение дозы облучения картофеля приводит к ослаблению сигнала пика 996 см^{-1} и сказывается на форме пика. При дозах облучения 400 кГр этот сигнал уже регистрируется не как пик, а проявляется в виде плеча, что осложняет определение интенсивности данной полосы поглощения. Из-за этого не получается оценить влияние дозы облучения на двойную спираль в кристаллической структуре крахмала, содержащегося в порошках мякоти картофеля. Данный способ изучения двойной спиральности кристаллической структуры крахмала, используя соотношения интенсивностей полос I_{996}/I_{1022} в ИК-спектрах крахмала, описан в работах [27, 28]. Однако наблюдаемое снижение относительной интенсивности пика 996 см^{-1} в спектрах мякоти с дозой облучения свидетельствует о процессе разрушения двойной спирали в кристаллической области крахмала, содержащегося в порошке мякоти облученных клубней картофеля. Также стоит отметить, что переход сигнала от вида плеча к острому пику при 1022 см^{-1} с повышением дозы облучения на фоне ослабления интенсивностей сигналов при 1042 и 996 см^{-1} косвенно указывает на аморфизацию структуры крахмала в порошке мякоти, что является результатом радиационной деструкции макромолекулы крахмала.

ИК-Фурье спектры сока, выделяемого в ходе γ -облучения и кожуры облученных клубней картофеля

Для сравнительного анализа на рис. 4 приведены ИК-Фурье спектры порошка высушенного сока картофеля, выделявшегося в ходе радиолитиза,

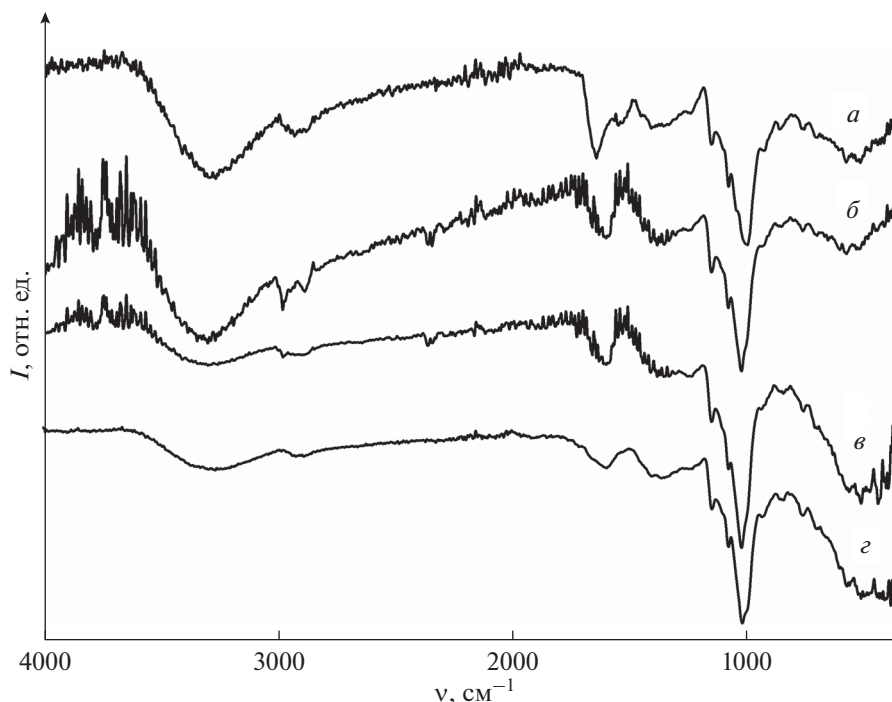


Рис. 4. ИК-Фурье спектры порошка мякоти (*а, б*), кожуры (*в*), до (*а*) и после облучения клубней картофеля (*б, в*), а также сока (*з*), выделявшегося в ходе радиоллиза. Доза γ -облучения 1000 кГр.

мякоти и кожуры, облученных дозой 1000 кГр клубней картофеля. В них, в основном, регистрируются одни и те же полосы поглощения, заметно отличающиеся по интенсивности.

В экспериментах отмечено, что первоначальный соломенно-желтый цвет кожуры клубней в ходе радиоллиза постепенно меняется сначала на светло-коричневый, а затем на темно-коричневый с повышением дозы облучения. Окраска мякоти также меняется с желтого до светло-коричневого цвета при дозах облучения свыше 1000 кГр. Наиболее заметное изменение от дозы наблюдается в цвете сока, выделяемого в ходе облучения клубней. Окраска сока со светло-коричневого при дозах около 1000 кГр переходит в темно-коричневый после дозы облучения 4000–5000 кГр. Подобное изменение цвета при радиоллизе, скорее всего, связано с накоплением в структуре макромолекул клубней картофеля различных хромофорных групп ($C=C$, $C=O$), а также имеющихся в их составе ауксохромной группы OH , вызывающей более глубокую интенсивность цвета, усиливая действия хромофорных групп. Имеющиеся в литературе данные об образовании различных органических кислот и других продуктов, содержащих $>C=O$ фрагменты в ходе радиоллиза полисахаридов [29], в том числе крахмала [30], также свидетельствуют в пользу образования продуктов радиоллиза, содержащих $>C=O$ фрагменты при радиоллизе клубней картофеля.

Несмотря на это, при анализе спектров на рис. 5 можно заметить практическое отсутствие характерной для полисахаридов полосы поглощения $>C=O$ групп в ИК-спектрах порошка мякоти (спектр *б*) и кожуры (спектр *в*) γ -облученных клубней картофеля. Полоса поглощения карбонильных групп проявляется только в спектрах порошка сока в виде пика при 1715 см^{-1} , связанного с валентными колебаниями групп $>C=O$ и его интенсивность растет с дозой γ -облучения (рис. 5, спектры *г* и *д*).

Видимо, органические кислоты, образующиеся в ходе радиоллиза клубней картофеля, растворяются в соке клубня, и удаляются вместе с соком из нее. Поэтому в ИК-спектрах мякоти и кожуры облученного картофеля не проявляются полосы поглощения карбонильных групп. Кроме того, образующиеся в ходе радиоллиза клубней картофеля органические кислоты, согласно данным по образованию кислот при радиоллизе полисахаридов [29], являются достаточно низкомолекулярными и, следовательно, могут легко улетучиваться при комнатной температуре в ходе высушивания продуктов радиоллиза клубней картофеля.

В работе [31] было показано, что рассматриваемые в настоящей работе порошки мякоти, кожуры и сока облученных клубней картофеля не обладают высокой токсичностью при пероральном кормлении животных. Поэтому, их, как и порошки необлученных клубней картофеля, безопасно

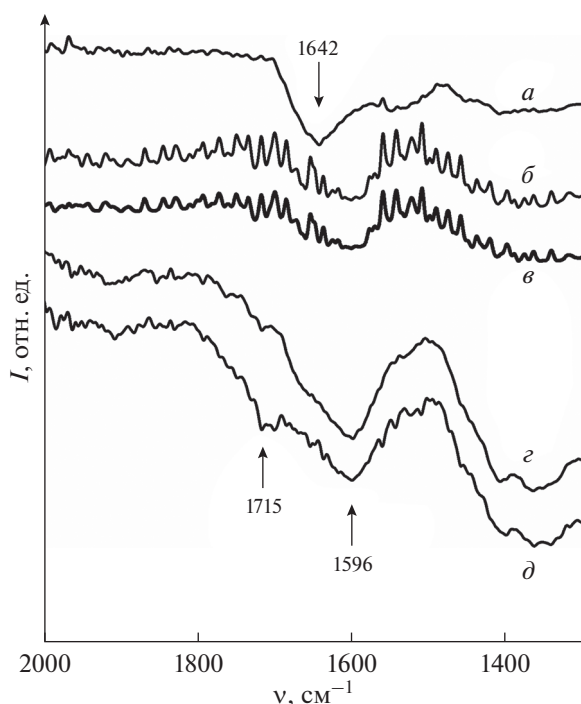


Рис. 5. Расширенные ИК-Фурье спектры порошка мякоти (*а, б*), кожуры (*в*), до (*а*) и после облучения клубней картофеля (*б, в*), а также сока (*г, д*), выделявшегося в ходе радиолитиза. Доза γ -облучения (кГр): 1000 (*а-г*), 4000 (*д*).

использовать в качестве питания для животных. Видимо, исчезновение в составе порошковых продуктов радиолитиза клубней картофеля — мякоти и кожуры, а также низкое содержание в составе высушенного сока облученных клубней органических кислот обеспечивает низкую токсичность порошков клубней картофеля, облученных до 5000 кГр.

Как было выше упомянуто, процесс выделения заметного количества сока в ходе радиолитиза клубней картофеля начинается после дозы облучения свыше 1000 кГр. Естественно, в ходе радиолитиза до этих доз, большая часть водородных связей с участием гидроксидов разрушаются. Поэтому в спектрах порошка сока облученных дозами >1000 кГр клубней полосы поглощения связанных гидроксидов при 3286 см^{-1} проявляются с низкой относительной интенсивностью, а также на их интенсивность практически не влияет дальнейшее повышение дозы до 5000 кГр.

Ход кривой зависимости относительной интенсивности полос поглощения при 1642 см^{-1} , связанных с гидратированными молекулами воды в порошке сока облученных клубней (кривая *г*) аналогичен кривой зависимости относительной интенсивности полос поглощения связанных гидроксидов (кривая *в*). Подобная аналогия наблюдается и для зависимостей в порошках мякоти и

кожуры облученных клубней (рис. 5). Видимо, с повышением дозы облучения клубней картофеля параллельно происходят процессы обезвоживания и разрушение водородных связей с участием гидроксидов.

Вероятно, обезвоживание клубней картофеля в ходе радиолитиза и высушивания продуктов радиолитиза также не повышают острую токсичность облученного картофеля.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- γ -облучение клубней картофеля приводит к изменениям в ИК-спектрах порошков, полученных при измельчении высушенной мякоти, сока и кожуры облученных клубней;
- в ИК-спектре порошка сока, выделявшегося в ходе радиолитиза клубней наблюдается повышение интенсивности полос поглощения карбонильных связей $>\text{C}=\text{O}$ и кумулированных связей $=\text{C}=\text{C}$, а также снижение интенсивности полос $\text{C}-\text{OH}$ -связей, что свидетельствует о карбонизации макромолекул веществ, составляющих клубень и их радиационное окисление;
- анализ спектров порошка мякоти, кожуры и сока облученных клубней картофеля показывает их подобность, в них сохраняются свойственные в большей части полисахаридам полосы поглощения в ИК области. Таким образом, показано, что γ -радиолитиз дозой до 5000 кГр не приводит к полному разрушению химических связей в структуре основных соединений, содержащихся в клубнях картофеля;
- внешний вид клубней картофеля зависит от дозы γ -облучения. При дозах облучения свыше 1000 кГр в них полностью теряются первичная твердость, нарушается целостность поверхности кожуры и начинается интенсивное выделение сока;
- видимо из-за накопления в структуре макромолекул клубней картофеля различных хромофорных групп ($=\text{C}=\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$), а также ауксохромной группы OH , первоначальный соломенно-желтый цвет кожуры, мякоти и сока клубней постепенно меняется сначала на светло-коричневый, а затем на темно-коричневый с повышением дозы облучения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Государственного задания АААА-А19-119041090087-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nouri J., Toofanian F. // Pakistan journal of biological science. 2001. V. 4. P. 1275.

2. *Rezaee M., Amasi M., Farhani A.M., Minae S., Khodadadi M.* // J. Agr. Sci. Tech. 2011. V. 13. P. 829.
3. *Singh S., Singh N., Ezekiel R., Kaur A.* // Carbohydrate polymers. 2010. V. 10. P. 1016.
4. *Мусина О.Н., Коновалов К.Л.* // Пищевая промышленность. 2016. № 8. С. 46.
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.
7. *Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Аллаяров С.Р., Бадамшина Э.Р.* // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. С. 224.
8. *Abdelrazek E.M., Elashmawi I.S., Ragab H.M.* // Physica. B. 2008. V. 403. P. 3097.
9. *Wu K.H., Wang Y.R., Hwu W.H.* // Polym. Degr. Stab. 2003. V. 79. P. 195.
10. *Hesse M., Meier H., Zeeh B.* // Spectroscopic Methods in Organic Chemistry. Zurich: Thieme 2 edition, 2007. 468 p.
11. *Sudheesh C., Sunooj K.V., George J., Kumar S., Vikas, Sajeevkumar V.A.* // Radiat. Phys. Chem. 2019. V. 162. P. 54.
12. *Исмазова Р.А., Амонова М.М.* // Universum: технические науки: научный журнал. 2021. № 6 (87). С. 34.
[https://7universum.com/pdf/tech/6\(87\)%20\[15.06.2021\]/Ismatova.pdf](https://7universum.com/pdf/tech/6(87)%20[15.06.2021]/Ismatova.pdf)
13. *Тринеева О.В., Рудая М.А., Гудкова А.А., Сливкин А.И.* // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. № 4. С. 187.
14. *Allayarov S.R., Rudneva T.N., Demidov S.V., Allayarova U.Yu., Klimanova E.N.* // High Energy Chemistry. 2022. V. 56. № 6. P. 429.
15. *Тарасевич Б.Н.* // ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. Химический факультет МГУ. М.: 2012. 54 с.
16. *Santha N., Sudha K.G., Vijaykumari K.P., Nayar V.U., Moorthy S.N.* // Indian Acad. Sci. (Chem. Sci.). 1990. V. 102. P. 705.
17. *Wilson R.H., Goodfellow B.J., Belton P.S., Osborne B.G., Oliver G., Russell P.L.* // J. Sci. Food Agric. 1991. V. 54. P. 471.
18. *Brasoveanu M., Nemtanu M.R.* // Applications of Modified Starches / edit. E. Flores Huicochea, R. Rendon. Chapter 5. London: IntechOpen, 2017. P. 49.
19. *Kizil R., Irudayaraj J., Seetharaman K.J.* // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2002. V. 50. P. 3912.
20. *Седакова В.А., Громова Е.С.* // Вестник фармации. 2011. V. 54. № 4. С. 17.
21. *Cael J.J., Koenig J.L., Blackwell J.* // Biopolymers. 1975. V. 14. P. 1885.
22. *Capron I., Robert P., Colonna P., Brogly M., Planchot V.* // Carbohydrate Polymers. 2007. V. 68. № 2. P. 249.
23. *Зуев В.В.* // Применение ИК спектроскопии на предприятиях ТЭК: Учебно-методическое пособие. Университет ИТМО: СПб. 2020. 61 с.
24. *Xie X., Liu Q., Cui S.W.* // Food Research International. 2006. V. 39. № 3. P. 332.
25. *Pearson F.G., Marchessault R.H., Liang C.Y.* // J. Polymer Sci. 1960. V. 43. P. 101.
26. *Iqbal S., Wu P., Kirk T.V., Chen X.D.* // Food Hydrocoll. 2021. V. 110. P. 106171.
27. *Shah A., Masoodi F.A., Gani A., Ashwar B.A.* // Food Chem. 2016. V. 212. P. 74.
28. *Wang B., Dong Y., Fang Y., Gao W., Kang X., Liu P., Yan S., Cui B., Abd El-Aty A.M.* // Food Chem. 2022. V. 368. P. 130804.
29. *Ершов Б.Г.* // Успехи химии. 1998. Т. 67. № 4. С. 353.
30. *Коротченко К.А., Приступа А.И., Шарпаты В.А.* // Химия высоких энергий. 2004. Т. 38. № 2. С. 107.
31. *Аллаярова А.С., Шитикова А.В., Файнгольд И.И., Аллаярова У.Ю., Климанова Е.Н., Сашенкова Т.Е., Демидов С.В., Чекалина С.Д., Аллаяров С.Р.* // Химия высоких энергий. 2023. Т. 57. № 4. С. 304.