

ВЛИЯНИЕ БОЛЬШИХ ДОЗ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ВСХОЖЕСТЬ И ТОКСИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕМЯН ОВСА

© 2023 г. С. Р. Аллаяров^а, *, У. Ю. Аллаярова^а, Е. Н. Климанова^а, С. В. Демидов^а, Т. Е. Сашенкова^а, С. В. Блохина^а, Д. В. Мищенко^{а, б}

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

^бНаучно-образовательный центр в г. Черноголовка
Московского государственного областного университета, Мытищи, 141014 Россия

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

Поступила в редакцию 26.05.2022 г.

После доработки 08.11.2022 г.

Принята к публикации 10.11.2022 г.

Исследовано влияние дозы γ -облучения от 100 до 3000 кГр на токсические свойства и всхожесть семян овса. Отмечена тенденция снижения всхожести семян овса в лабораторных условиях в интервале доз предпосевного облучения 10–700 Гр на 15–25%. После облучения дозой свыше 1 кГр семена теряют способность всходить. На кривых, отражающих зависимость длины стеблей овса от дозы предпосевного облучения семян, наблюдаются две области с характерной точкой разделения при дозах 70 Гр, меньше которых заметно повышается степень влияния дозы облучения на высоту всходов и способность их роста. Токсичность радиолизованных зерен овса зависит от дозы γ -облучения зерен и режима дополнительной подкормки подопытных мышей. Установлено, что доза γ -облучения до 100 кГр не сказывается на токсичности кормового зерна овса, а дозы облучения 400 кГр и больше делают непригодными облученные зерна для кормления мышей без дополнительной подкормки комбикормами. Чем больше доза γ -облучения зерна овса, тем раньше массово гибнут подопытные мыши – при дозах облучения 580, 1000, 1700 и 3170 кГр, соответственно, на 14–15, 9, 8 и 6 сутки кормления. Причиной токсического проявления облученных зерен овса и гибель мышей, получавших облученное зерно, видимо, может стать появление в облученных высокими дозами зерен овса токсических веществ вследствие протекания физико-химических реакций, возникающих во время и после облучения; снижение пищевой ценности продуктов, связанное с разрушением витаминов и других компонентов пищи. Интоксикация после употребления облученных дозой 400–3170 кГр зерен овса клинически проявляется угнетением, вялостью животных, признаками обезвоживания и диареи на фоне сильного снижения массы тела экспериментальных животных. Радиолизованные зерна овса целесообразно использовать в технических целях, особенно, если они обработаны большими дозами облучения.

Ключевые слова: семена овса, гамма-облучение, всхожесть и токсичность облученных семян

DOI: 10.31857/S002311932302002X, **EDN:** NGKZOM

ВВЕДЕНИЕ

С практической точки зрения, имеются три общие группы задач, которые решаются при помощи обработки пищевых и сельскохозяйственных продуктов ионизирующим излучением [1]. Низкие дозы облучения (от 3 до 1000 Гр) используются для стимуляции семян сельскохозяйственных культур, задержки созревания и прорастания, дезинсекции, дезактивации паразитов. Средние дозы облучения (от 1 до 10 кГр) – для снижения количества гнилостных бактерий и болезнетворных микроорганизмов, стерилизации и улучшения технологических свойств пищи, сокращения времени сушки и кулинарной обработки. Высокие дозы облучения (свыше 10 кГр) применяют для

снижения численности микроорганизмов до уровня стерильности, производства микробиологически безопасной пищевой продукции с использованием тепловой инактивации и радиационной стерилизации после замораживания. В результате, наряду со стерилизацией медицинских изделий и модификации полимеров, основными сферами применения радиационной обработки стали дезинсекция и повышение урожайности сельскохозяйственных культур, радиационная и радиационная стерилизация пищевых продуктов [2–4]. К настоящему моменту изучены преимущества обработанных ионизирующим излучением продуктов питания, и рассмотрены особенности технологий их радиационной обработки [5–7], а также исследовано влияние дозы

облучения на потребительскую ценность сельскохозяйственной продукции [7–11]. К сожалению, дозы облучения, при которых были проведены эти исследования, в основном, ограничиваются диапазоном доз, необходимых для осуществления вышеуказанных процедур радиационной стерилизации. По этой причине в литературе практически отсутствует информация о влиянии относительно больших доз радиации (>500 кГр) на токсичность и потребительские свойства пищевых и сельскохозяйственных продуктов. В связи с этим одним из предметов настоящего исследования было изучение влияния дозы облучения от 100 до 3000 кГр на биологическую безопасность употребления в пищу зерен овса.

В определенном диапазоне дозы облучения, радиация обладает стимулирующим действием, в результате которого, наряду с увеличением урожайности, в растениях активизируется накопление органических веществ и усиливается минеральное питание в зависимости от вида растения. В настоящем сообщении также изучено влияние дозы γ -облучения семян овса на его всхожесть в лабораторной станции.

Таким образом, целью настоящей работы являлось разностороннее изучение влияния больших доз γ -облучения на токсические свойства и всхожесть семян овса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

В работе использовали зерна овса из урожая 2021 г., произведенных 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 целого зерна (ЦЗ), его порошка, полученного при измельчении ЦЗ и зерновик, полученный путем механического удаления оболочки от ЦЗ. Для кормления животных использовали комбикорм “ЧАРА” полнорационный для содержания конвенциональных мелких лабораторных грызунов (мышей, крыс, хомяков), апатогенный (ГОСТ 23462) производства ООО “Ассортимент агро”. Корм сбалансирован по аминокислотному составу, минеральным веществам и витаминам, изготовлен из высококачественных компонентов.

Измельчение

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

ЦЗ овса измельчались до порошка с размером частиц менее 200 микрон.

Гамма-облучение

Предпосевное облучение ЦЗ овса проводилось на воздухе при 30°C γ -лучами Co^{60} на УНУ “Гамматок-100” ИПХФ РАН. Особенности данной установки и возможности ее использования подробно описаны в работе [12]. Мощность дозы облучения 2.8 Гр/с.

Изучение всхожести

Изучение всхожести семян овса до и после γ -облучения проводилось в лабораторных условиях в ИПХФ РАН. Механический состав почв для посева зерен был сформирован из готового к применению коммерческого грунта “Агрикола” универсальный”, производимого ЗАО “Торгово-промышленная компания Техноэкспорт” (Россия). В его составе по данным производителя содержится азот в составе NH_4NO_3 – не менее 300 мг/л, фосфор в составе P_2O_5 – не менее 300 мг/л, калий в составе K_2O – не менее 430 мг/л, pH солевой суспензии грунта 5.5. Семена высаживались на глубину 2–3 см с плотностью 1 зерно на 10 см². Повторность лабораторного опыта была двукратная. Основное правило его проведения – выполнение каждой из работ во всех вариантах опыта в течение одного дня. Отмечали начало всходов, полные всходы и длину стебля.

Изучение токсичности зерен овса, облученных γ -излучением ^{60}Co

Эксперименты по определению влияния различных доз γ -облучения на токсичность зерен овса проводились на самцах мышей линии C57Bl/6. В опыте использовались клинически здоровые животные, находившиеся в одинаковых условиях содержания и кормления. Каждый день регистрировалось изменение массы тела мышей и внешние проявления интоксикации. После окончания эксперимента все выжившие животные были подвергнуты эвтаназии для определения массовых коэффициентов органов и патоморфологического исследования.

В первой части эксперимента определения токсических свойств зерен, облученных дозами 100–3170 кГр, подопытные животные, весом 23–25 г были распределены по группам по 5 голов. Каждая группа получала по 40 г облученного зерна (по 8 г зерна на 1 мышь) в сутки. В качестве контроля использовали две группы: одна получала только необлученное зерно по 40 г в день, вторая получала полноценное питание (смесь необлученного зерна и комбикорм).

Вторая часть исследования по установлению токсических свойств γ -облученных зерен включает в себя две серии опытов с различным режимом кормления. В первом режиме подопытным мышам ежедневно однократно с помощью атравматичного зонда вводили внутривентрикулярно дисперсию в воде размолотых до порошка γ -облученных зерен овса в дозе 5000 мг/кг. Кроме того, животные получали комбикорм в неограниченных количествах (рацион (I)).

Во втором режиме кормления подопытные животные также ежедневно внутривентрикулярно получали однократно дисперсию в воде размолотых до порошка γ -облученных зерен овса в дозе 5000 мг/кг и дополнительно их подкармливали только целыми зернами овса, облученными той же дозой (рацион (II)).

В обоих режимах кормления эксперименты по определению токсичности радиолитованных зерен овса проводили на самцах мышей, распределенных в каждой группе по 5 животных случайным образом и находившиеся в одинаковых условиях содержания и кормления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Токсические свойства γ -облученных зерен овса

Выживаемость животных при кормлении стандартным рационом питания вивария ИПХФ РАН (смесь необлученного зерна и комбикорм), не облученными и облученными различной дозой зернами овса приведена на рис. 1.

В ходе кормления зерном, облученным дозой 580 кГр, все мыши погибли на 14–15 сутки. При кормлении мышей только одними зернами овса, облученными дозами 1000, 1700 и 3170 кГр все животные погибают на 9, 8 и 6 суток кормления соответственно. Как видно, чем больше доза облучения зерна, тем раньше массово гибнут животные, употреблявшие его. У всех умерших животных наблюдалось значительное снижение массы тела перед гибелью (рис. 2, кривые *e*, *ж*, *з*, *и*). Это может быть связано одновременно с двумя причинами: животные плохо ели облученный овес или снизилось количество питательных веществ в радиолитованном зерне. Мыши, получавшие зерно, облученное дозой 400 кГр, были умерщвлены на 22 сутки эксперимента в связи с сильным снижением массы тела (рис. 2, кривая *д*) и страданиями животных.

Клинические проявления интоксикации у групп животных, получавших овес с дозами γ -облучения 400–3170 кГр, характеризовались угнетением, вялостью животных; шерсть была взъерошена. Также наблюдались признаки обезвоживания и диареи на фоне сильного снижения массы тела экспериментальных животных. При проведении патологоанатомического вскрытия, была отмечена гиперемия слизистой желудка и кишечника. Печень и

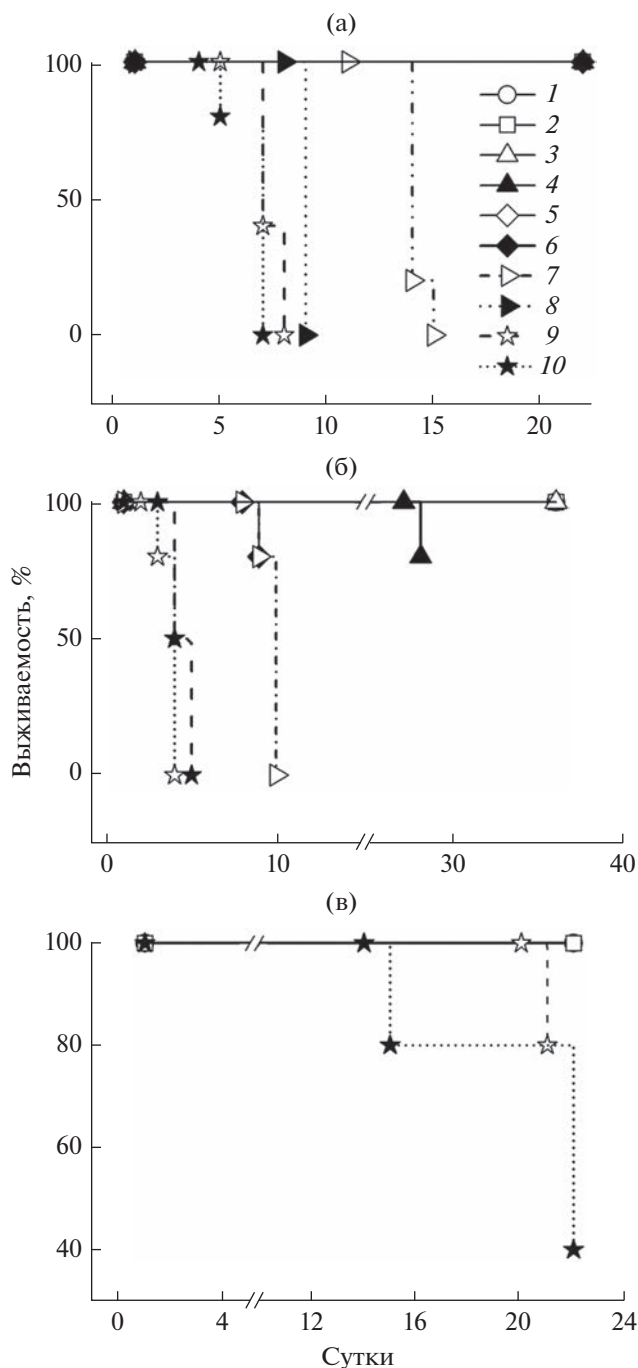


Рис. 1. Выживаемость животных при кормлении стандартным рационом питания вивария ИПХФ РАН (1), необлученными (2) и облученными зернами овса (3–10). Кормление целыми облученными зернами (а) и внутривентрикулярное кормление суспензией порошка предварительно облученного зерна в воде (б, в), и дополнительной подкормкой облученными целыми зернами овса (а, б) и комбикормами (в). Доза облучения (кГр): 100 (3), 200 (4), 310 (5), 400 (6), 580 (7), 1000 (8), 1700 (9), 3170 (10).

почки без видимых очагов некроза; сердце, легкие и селезенка без изменений. Массовые коэффициенты печени, почек и селезенки мышей, получав-

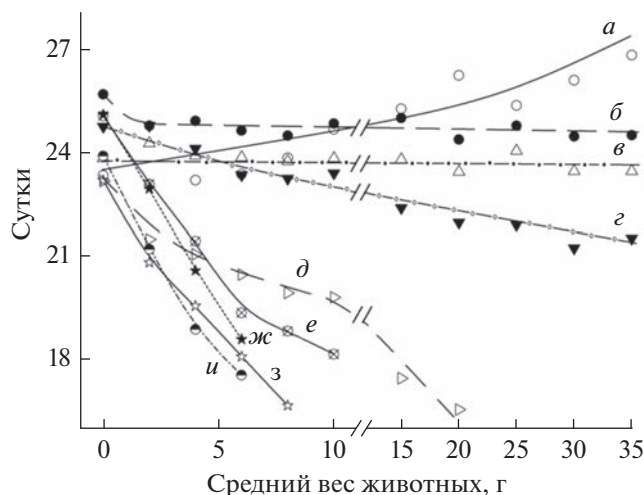


Рис. 2. Изменение массы тела экспериментальных животных, получавших стандартный рацион питания вивария ИПХФ РАН (*а*), не облученные (*б*) и облученные зерна овса (*в–и*). Дозы облучения (кГр): 100 (*в*), 310 (*г*), 400 (*д*), 580 (*е*), 1000 (*ж*), 1700 (*з*), 3170 (*и*).

ших облученное зерно, были ниже соответствующих показателей животных контрольной группы.

Таким образом, экспериментально установлено, что дозы γ -облучения 400 кГр и выше делают зерно непригодным для безопасного кормления животных.

Следует отметить, что в группах животных, получавших только необлученное (кривая *б*) или облученное дозой 100 кГр зерно (кривая *в*) масса тела животных во время эксперимента практически не изменилась (рис. 2), и не наблюдалась гибель животных (рис. 1). Клиническое состояние опытных животных было хорошим на протяжении всего времени наблюдения и не отличалось от состояния животных контрольной группы. Реакция на внешние раздражители была адекватной. Случаев интоксикации и расстройства пищеварения установлено не было. Следовательно, доза γ -облучения 100 кГр и меньше не сказывается на токсичности и пищевой ценности зерен овса. Однако следует отметить, что животные, получавшие полноценный стандартный рацион питания вивария ИПХФ РАН за время эксперимента прибавили в весе в среднем на 3.5 г (рис. 2, кривая *а*).

В случае вскрытия и макроскопического исследования внутренних органов у мышей в опытных группах с зерном, не облученным и облученным дозой 100–310 кГр, патологических изменений внутренних органов обнаружено не было. Кожа и шерсть без видимых изменений, внутренние органы нормального размера, формы и топографического расположения, признаки отека, раздражения и кровоизлияний отсутствовали. Весовые коэффициенты внутренних органов (печень, почки,

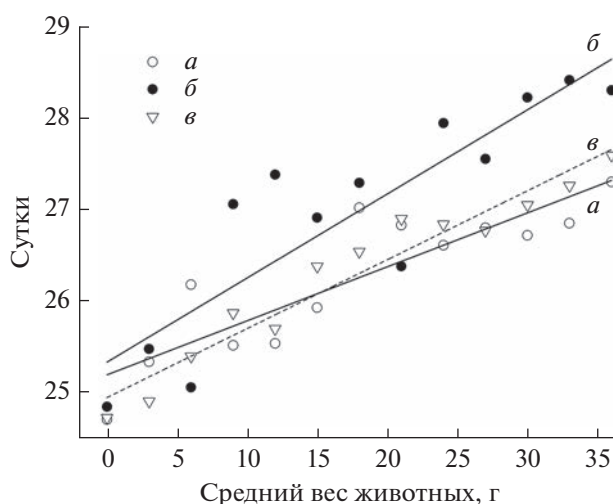


Рис. 3. Изменение массы тела экспериментальных животных при определении токсических свойств не облученного (*а*) и γ -облученного зерна овса (*б, в*). Дозы облучения (кГр): 1700 (*б*), 3170 (*в*).

сердце, и др.) к массе тела экспериментальных мышей опытной и контрольной групп не имели достоверных различий.

Для проведения кормления по рациону (I) были использованы зерна овса, облученные с дозами 1700 и 3170 кГр. Длительность эксперимента составила 36 дней, после чего выжившие животные были подвергнуты эвтаназии с последующим вскрытием.

Выживаемость животных в процессе данного режима кормления приведена на рис. 1. Их гибель была отмечена в группе с дозой облучения зерна 3170 кГр – 20 и 40% мышей на 15 и 23 сутки эксперимента соответственно. В группе с дозой облучения 1700 кГр – 20% опытных животных пали на 21 сутки. В контрольной группе, получавшей необлученный овес, все мыши выжили. При этом во всех экспериментальных группах наблюдалось достоверное увеличение массы тела животных (рис. 3).

Визуальные наблюдения за состоянием подопытных животных за весь срок проведения данного эксперимента показали, что все они были активны, шерсть блестящая, каких-либо отклонений от контроля не обнаружено. При патоморфологическом исследовании изменения во внешнем виде органов выживших животных не наблюдались и не отличались от контрольной группы. Массовые коэффициенты внутренних органов опытных групп соответствовали полученным массовым коэффициентам в контрольной группе.

Таким образом, проведенный опыт показал, что кормление животных зерном, облученным достаточно высокой дозой γ -излучения (1700–3170 кГр), в случае дополнительной подкормки животных

комбикормами в неограниченном количестве не приводит к серьезным клиническим проявлениям интоксикации, хотя, в ходе эксперимента наблюдалось некоторое снижение выживаемости животных. При этом у подкормленных комбикормами животных, независимо от дозы облучения кормового зерна, наблюдается увеличение массы тела.

Во втором режиме кормления по рациону (II) для исследования токсических свойств облученных зерен овса были выбраны дозы γ -облучения 200, 400, 600, 1700 и 3170 кГр. Длительность исследования составила 33 дня, после чего все выжившие мыши были подвергнуты эвтаназии и последующему вскрытию. Полученные результаты представлены в виде зависимостей выживаемости (рис. 1) и изменений массы тела экспериментальных животных (рис. 4) от дозы предварительного γ -облучения зерен кормового овса. Из полученных данных, приведенных на рис. 1, видно, что применение комбинированного кормления одними облученными цельными и размолотыми в порошок зернами овса приводит к более сильным токсическим эффектам, чем при кормлении животных размолотыми зернами овса в сочетании с комбикормом. В данном случае, при кормлении в дозах облучения 1700 и 3170 кГр в комбинации с облученными цельными и размолотыми в порошок зернами овса, животные гибнут уже на 3–5 сутки кормления (рис. 1). При этом у животных наблюдалось угнетенное состояние, шерсть тусклая, сильная потеря массы тела (рис. 4, кривые *д*, *е*).

В группе животных, получавших кормление зерном с дозой облучения 600 кГр по рациону (II), также наблюдается заметная потеря массы (рис. 4, кривая *з*), активность животных низкая, шерсть тусклая, взъерошенная с очагами алопеции, есть признаки дегидратации и диареи и, как следствие, смерть животных на 11 сутки эксперимента (рис. 1). Как видно из рис. 4, у мышей, употреблявших зерна овса, γ -облученных дозами 200 кГр (кривая *б*) и 400 кГр (кривая *в*) также отмечается постепенное уменьшение веса, животные малоактивны, шерсть тусклая с очагами алопеции, наблюдаются признаки обезвоживания и диареи. Выжившие мыши были умерщвлены на 33 сутки в связи с испытываемыми страданиями животных.

Патоморфологическое исследование внутренних органов подопытных животных, использованных для второго рациона кормления, не показало существенных различий во внешнем виде между опытными и контрольными группами. Однако массовые коэффициенты печени, почек и селезенки мышей, получавших облученное зерно, были достоверно ниже соответствующих показателей животных контрольной группы, что косвенно может указывать на токсическое проявление облученного зерна. При этом токсические свой-

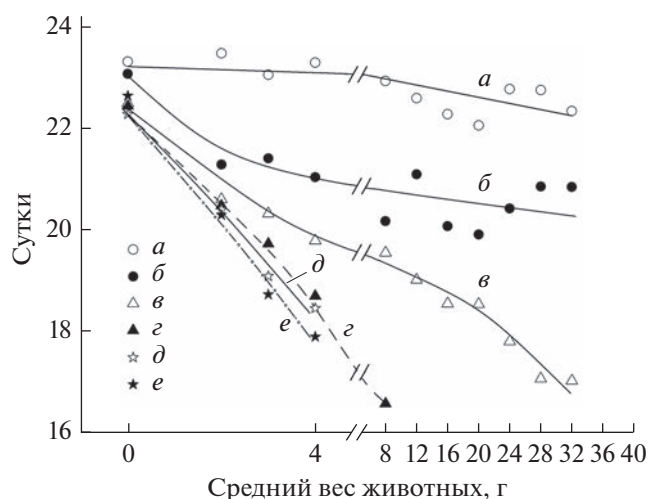


Рис. 4. Изменение массы тела экспериментальных животных при определении токсических свойств не облученного (*а*) и γ -облученного зерна овса (*б*, *в*, *г*, *д*, *е*). Дозы облучения (кГр): 200 (*б*), 400 (*в*), 600 (*г*), 1700 (*д*), 3170 (*е*).

ства облученного овса возрастают с увеличением дозы облучения.

Следует отметить, что в группе животных, получавших в комбинации только не облученные цельные и размолотые в порошок зерна овса, масса тела животных во время эксперимента в течение 32 суток практически не изменилась (рис. 3, кривая *а*) и все подопытные животные выжили (рис. 1). Таким образом, данный эксперимент показал насколько небезопасно кормление животных только одним облученным зерном овса, по сравнению с режимом кормления с дополнительной подкормкой комбикормами (рис. 2, кривая *а*).

Зерно овса многокомпонентное, основными веществами в его составе являются углеводы, вода, белки, липиды, витамины и другие соединения, неодинаково распределенные в различных частях зерна [11]. При этом содержание крахмала в составе углеводов в зависимости от вида и сорта овса колеблется от 36 до 59%, в то же время сами углеводы составляют 65–80% состава зерна овса. Следовательно, основным составляющим зерен овса является крахмал. Не исключено, что именно те вещества, которые образуются при радиоллизе крахмала, могут быть причиной вышеописанного повышения токсичности с дозой γ -облучения зерен овса, особенно при дозах 1700–3000 кГр.

Как известно [14], при радиоллизе крахмала ускоренными электронами от 110 до 440 кГр наблюдается увеличение с ростом дозы облучения содержания окисленных групп. При этом доля карбоксильных групп в облученном картофельном крахмале намного превышает долю карбонильных, тогда как, по данным [15], при γ -облучении кукурузного крахмала теми же дозами преобладают

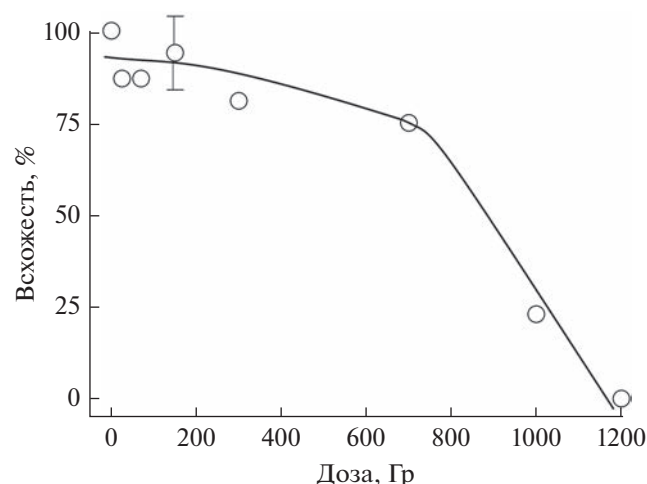


Рис. 5. Зависимость всхожести семян овса через 18 суток после посадки от дозы их предпосевого γ -облучения.

кетогруппы. Видимо, на процесс радиолитического крахмала и образования кислородсодержащих продуктов влияет вид источника, из которого выделили крахмал.

Из литературных источников известно, что в ходе радиолитического крахмалсодержащего сырья образуется и с дозой облучения накапливается большое количество органических кислот (уксусная, щавелевая, молочная, янтарная, яблочная [16]), оксиметил-фурфурола [16], формальдегида [17] и других продуктов. Некоторые из них, например, формальдегид, являются неблагоприятными для живых организмов и обладают токсическим и канцерогенным действием на живую клетку. Видимо, одной из причин токсического проявления облученных зерен овса и гибель мышей, получавших облученное зерно, является накопление в составе облученных высокими дозами зерен овса кислот, формальдегида и других токсичных продуктов радиолитического. Действительно, увеличение содержания кислородсодержащих фрагментов ($C=O$, $C-O-C$, $O-N$) наблюдается с повышением дозы γ -облучения зерен овса, при этом, как показано в работе [13], воздействие достаточно высоких доз γ -излучения (до 3000 кГр) не приводит к полному разрушению химических связей в структуре соединений, содержащихся в зернах овса.

Исходя из вышеизложенного и с экологической точки зрения, радиолитические зерна овса целесообразно использовать в технических целях, особенно в случае относительно больших доз радиационной обработки.

Лабораторная всхожесть радиолитических семян овса

Результаты исследований, проведенных в лаборатории криохимии и радиационной химии ИПХФ РАН с целью изучения влияния дозы предпосевого γ -облучения на лабораторную всхожесть семян овса указывают на тенденцию снижения на 15–25% всхожести семян при их предпосевном γ -облучении дозами 10–700 Гр (рис. 5).

В аналогичных условиях посева необлученного овса лабораторная всхожесть достигает 95–100%. Снижение всхожести семян над контролем на 65–85% наблюдается после их обработки дозой γ -излучения 1000 Гр, а семена, облученные дозой 1200 Гр, вообще не всходили. Однако при визуальном осмотре извлеченных из-под грунта семян, не всходивших после посева, независимо от дозы их предпосевого γ -облучения, было обнаружено набухание и прорастание, а в некоторых из них появление первичных корешков и запуск процесса развития ростка. Видимо, накопленные дозы γ -излучения 1000 Гр в большей части облученных семян приводят к угнетению развития и задержке появления всходов. Предпосевное облучение семян дозой 1200 Гр приводит к их гибели на стадии прорастания, и они остаются под грунтом.

На кривых, отражающих зависимость длины стеблей овса от дозы предпосевого облучения семян, имеется точка излома при 100 Гр (рис. 6). С повышением дозы облучения семян до 70 Гр заметно повышается степень отрицательного влияния радиации на высоту всходов. В результате средняя высота всходов на 9 сутки после посева семян овса, необлученных и облученных дозой 70 Гр, составляет 16 и 11 см соответственно, т.е. повышение дозы облучения на 70 Гр приводит к укорачиванию длины всходов на 5 см. При этом дозы свыше 150 Гр предпосевого облучения семян также приводят к линейному снижению высоты всходов с повышением дозы облучения, но в этом случае наблюдается меньшая степень зависимости от абсолютной величины дозы облучения. В результате повышение дозы предпосевого облучения семян на 850 Гр от 150 до 1000 Гр приводит к уменьшению средней высоты стеблей всходов всего лишь на 7.5 см. Таким образом, на кривых зависимостей высоты всходов семян от дозы их предпосевого облучения, наблюдаются две области с характерной точкой разделения при дозах около 100 Гр и отличающихся разной степенью задержки высоты всходов.

ВЫВОДЫ

- Отмечена тенденция снижения всхожести семян овса с дозой их предпосевого облучения в интервале доз 10–700 Гр на 15–25%. После облучения семян дозой свыше 1000 Гр они практически

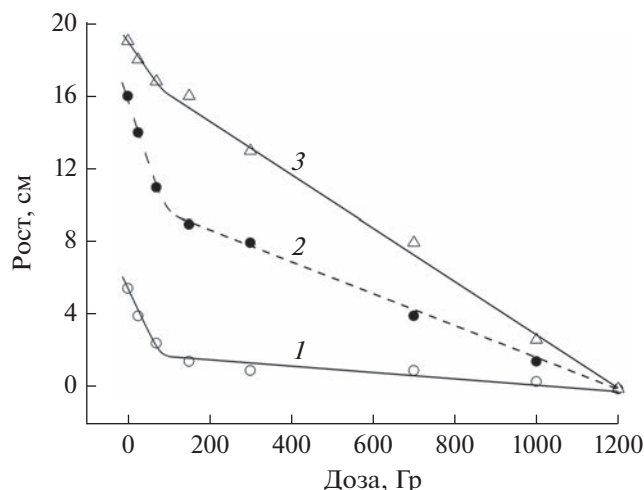


Рис. 6. Зависимость средней высоты всходов через 5 (1), 9 (2) и 18 (3) суток после посадки семян овса от дозы их предпосевого γ -облучения.

теряют способности всходить. Видимо, накопленные дозы γ -излучения свыше 700 Гр приводят к угнетению развития семян овса, задержке появления их всходов и убивает ростовые элементы клеток.

- На кривых, отражающих зависимость длины стеблей от дозы облучения, наблюдаются две области с характерной точкой разделения при дозах 70 Гр. Дозы предпосевого облучения семян 150 Гр и выше приводят к линейному с дозой снижению высоты всходов, измеренных через 5–18 суток после посадки облученных семян. В то же время, при дозах предпосевого облучения семян до 70 Гр заметно повышается степень влияния дозы облучения на высоту всходов и наибольшая потеря в относительных способностях роста всходов облученных семян.

- Кормление животных зерном, облученным высокими дозами γ -излучения (1700–3170 кГр), в случае дополнительной подкормки комбикормами в неограниченном количестве не приводит к серьезным клиническим проявлениям интоксикации, хотя у подопытных животных снижается выживаемость, несмотря на увеличение их массы тела не зависимо от дозы облучения кормового зерна.

- Дозы облучения 400 кГр и больше сделали не пригодными для безопасного кормления животных только одним облученным зерном овса. При этом, чем больше доза γ -облучения кормового зерна овса (580, 1000, 1700 и 3170 кГр), тем раньше массово гибнут животные (соответственно на 14–15, 9, 8 и 6 сутки кормления).

- Причиной токсического проявления облученных зерен овса и гибель мышей, получавших облученное зерно, видимо, является накопление в составе облученных высокими дозами зерен ов-

са кислот, формальдегида и других токсичных продуктов радиолиза.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козьмин Г.В., Санжарова Н.И., Кибина И.И., Павлов А.Н., Тихонов В.Н. // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 5. С. 87.
2. Diehl J.F. Safety of Irradiated Foods (Second Edition). Marcel Dekker, Inc., New York. 1995.
3. Farkas J. Irradiation of Dry Food Ingredients. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. 1988.
4. Johnston D.E., Stevenson M.H. Food Irradiation and The Chemist. Royal Society of Chemistry Special Publication. 1990. Number 86.
5. Чиж Т.В., Козьмин Г.В., Полякова Л.П., Мельникова Т.В. // Вестник Российской академии естественных наук. 2011. Т. 1. С. 44.
6. Санжарова Н.И., Гераськин С.А., Алексахин Р.М., Козьмин Г.В., Лой Н.Н. // Вестник Российской академии естественных наук. 2013. Т. 1. С. 21.
7. Bradshaw C., Kapustka L., Barnhouse L., Brown J. Ciffroy P., Forbes V., Geras'kin S., Kautsky U., Brechignac F. // J. Environ. Radioact. 2014. V. 136. P. 98.
8. Алексахин Р.М., Гераськин С.А., Удалова А.А. // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85. С. 373.
9. Ульяненко Л.Н., Удалова А.А. // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2015. Т. 24. С. 118.
10. Brechignac F., Bradshaw C., Carroll S., Jaworska A., Kapustka L., Monte L., Oughton D. // Integr. Environ. Assess. Manag. 2011. V. 7. P. 411.
11. Удалова А.А., Гераськин С.А., Дубынина М.А. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. С. 517.
12. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Аллаяров С.Р., Бадамшина Э.Р. // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. С. 224.
13. Allayarov S.R., Rudneva T.N., Demidov S.V., Allayarova U.Yu., Klimanova E.N. // High. Energy. Chem. 2022. Vol. 56. № 6. P.429.
14. Литвяк В.В., Батян А.Н., Кравченко В.А. // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. С. 62.
15. Коротченко К.А., Шарпаты В.А. // Химия высоких энергий. 1993. Т. 27. № 4. С. 50.
16. Шарпаты В.А. Радиационная химия биополимеров. М.: Геос, 2008. 249 С.
17. Шарпаты В.А. // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37. С. 416.