

БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Исследование воздействия рентгеновского излучения на концентрацию восстанавливающих сахаров в картофеле и на его прорастание

В. М. Авдюхина¹, У. А. Близнюк^{2,a}, П. Ю. Борщеговская², А. В. Бусленко²,
А. С. Илюшин¹, Е. Г. Кондратьева³, Г. А. Крусанов⁴, И. С. Левин¹, А. П. Сеницын³,
Ф. Р. Студеникин^{2,b}, А. П. Черняев^{2,4}

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
¹ кафедра физики твердого тела; ² кафедра физики ускорителей и радиационной медицины.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

*³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, химический факультет,
кафедра химической энзимологии. Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 11.*

*⁴ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелева (НИИЯФ МГУ).
Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^a uabliznyuk@gmail.com, ^b f.studenikin@gmail.ru*

Статья поступила 30.06.2017, подписана в печать 06.10.2017.

Проведено исследование воздействия рентгеновского излучения на клубни картофеля с целью установления дозы, необходимой для остановки их прорастания в различные периоды его хранения. Установлена связь дозы облучения со сроком хранения картофеля. Для контроля качества облученных клубней на протяжении всего исследования проводилось измерение концентрации восстанавливающих сахаров в клубнях облученного и необлученного картофеля.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, ингибирование прорастания картофеля, восстанавливающие сахара.

УДК: 539.1.047. PACS: 87.53.-j.

Введение

Согласно данным Российской академии народного хозяйства и государственной службы, в 2015 г. Россия собрала свыше 33.6 млн т картофеля, в 2016 г. — 31 млн т. В связи с большими объемами возникает необходимость в длительном хранении картофеля до следующего урожая.

Одной из основных проблем хранения картофеля является его прорастание, в результате которого клубни теряют форму, влагу и питательные вещества. В сельском хозяйстве применяются высокие дозы химических пестицидов для подавления прорастания клубней при хранении. Однако пестициды имеют свойство накапливаться в клубнях. В дополнение к химической обработке производители применяют технологию хранения картофеля при низких температурах от 5 до 8 °С, что приводит к замедлению прорастания клубней. Однако при таких температурах происходит увеличение содержания сахаров в картофеле, что может негативно сказаться при его последующей термической обработке, в частности картофель темнеет и приобретает горьковатый вкус. Таким образом, возникает необходимость в применении альтернативных методов защиты картофеля при его длительном хранении.

Радиационная обработка клубней картофеля является эффективным методом ингибирования их прорастания. В мире широко применяется гамма-излучение для облучения различных видов

овощей и фруктов с целью продления сроков хранения, в том числе и картофеля [1–5]. Существуют работы по исследованию воздействия гамма-излучения на биохимические, морфологические и структурные свойства картофеля. В [6] показано, что в дозах от 50 до 150 Гр не меняется питательная ценность картофеля и его органолептические свойства. При этом данные дозы позволяют значительно увеличить срок хранения картофеля. Существует исследование, в котором обрабатывали клубни картофеля в дозах 50–150 Гр спустя 10, 30 и 50 дней после сбора картофеля [5]. Показано, что более ранняя обработка гамма-излучением в более высоких дозах приводит к значительному ингибированию прорастания. При этом большое влияние оказывает температура хранения картофеля: чем выше температура, тем большая доза необходима для остановки прорастания. В клубнях, облученных в дозах 150 Гр, наблюдалось значительное снижение уровня аскорбиновой кислоты по сравнению с более низкими дозами. В [7] исследовали антиоксидантные свойства группы ферментов в картофеле после воздействия гамма-излучения в дозах 30–200 Гр и получили, что при дозе 50 Гр происходила остановка прорастания клубней, при этом активность ферментов имела наилучшие показатели по сравнению с другими дозами облучения. В [8] проведено сравнение различных методов, применяемых для остановки прорастания картофеля, в частности гамма-излучение, обработка

различными эфирными маслами и йодом. Получено, что радиационная обработка более эффективна по сравнению с химическими методами, при этом влияние на биохимические показатели клубней минимально.

В качестве альтернативы гамма-излучению и химической обработке применяют пучки электронов для остановки прорастания картофеля [9–11]. В [9] показано, что обработка клубней электронами с энергией 270 кэВ останавливает их прорастание, причем спустя 3 мес после облучения количество сахаров в облученных клубнях становилось меньше, чем до обработки. В [11] показано, что воздействие на картофель пучком ускоренных электронов с энергией 1 МэВ в дозах от 40 Гр и более является эффективным методом ингибирования его прорастания.

Целью данной работы является экспериментальное исследование воздействия рентгеновского излучения на прорастание клубней картофеля в различные периоды его хранения.

1. Объекты исследования и схема эксперимента

В качестве объекта исследования были выбраны клубни картофеля массой 100–120 г сорта «Жуковский ранний» урожая 2016 г. в количестве 100 кг, выращенные на базе Всероссийского научно-исследовательского института картофельного хозяйства им. А.Г. Лорха и собранные 20 августа 2016 г. Эксперимент проходил в четыре этапа. На этапе 1 было произвольным образом отобрано 198 клубней, которые облучались рентгеновским излучением спустя 2 мес после сбора урожая. На этапе 2 подвергли воздействию рентгеновского излучения 176 клубней через 3 мес хранения. Этап 3 облучения проходил спустя 4 мес хранения (154 клубня), этап 4 — через 5 мес после сбора урожая (132 клубня). Проведение более позднего облучения не имело смысла, так как к январю 2017 г. треть необлученного картофеля проросла, а к февралю практически все клубни имели проростки. Эксперименты и хранение картофеля происходили при температуре 12–15 °С.

В течение всего эксперимента, начиная с сентября 2016 г. по март 2017 г., следили за кинетикой прорастания облученных клубней и сравнивали ее с кинетикой контрольных необлученных образцов. Для контроля качества картофельных клубней для всех четырех этапов облучения в них ежемесячно измерялась концентрация восстанавливающих сахаров, которую определяли через 3–4 дня после облучения. Одновременно с этим измеряли сахара и в клубнях, облученных ранее. Полученные данные также сравнивались с концентрацией сахаров в контрольных необлученных образцах.

1.1. Облучение клубней картофеля

Клубни картофеля облучали рентгеновским излучением, источником которого являлся источник питания ПУР5/50 с рентгеновской трубкой БСВ-23

с молибденовым анодом. Ток трубки во всех экспериментах составлял 20 мА, напряжение 50 кВ, рабочая мощность трубки составляла 1 кВт. Облучение проходило с четырех окон трубки одновременно. Каждый клубень располагали на расстоянии 11 см от окна рентгеновской трубки. Время облучения варьировалось и составляло 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 40 и 50 мин, при этом все клубни облучались половину времени с одной стороны, затем их переворачивали и облучали с другой стороны для достижения равномерного облучения.

1.2. Расчет поглощенной дозы в клубне

Для оценки дозы, поглощенной в картофеле, использовался программный комплекс GEANT 4. При моделировании процесса прохождения рентгеновского излучения через картофель учитывались технические характеристики используемой рентгеновской трубки, а также схема облучения картофеля. Все параметры рентгеновской трубки были запрошены у производителя и с точностью до 0.1 мм воспроизведены в программе.

При моделировании предполагалось, что на цилиндрический анод из молибдена падает моноэнергетичный пучок электронов с энергией 50 кэВ, количество частиц в пучке составляло 2 млрд частиц. В поперечном сечении пучок представлял собой прямоугольник размером 1 × 10 мм. Учитывалось, что рентгеновская трубка имеет свинцовый корпус, фотоны вылетают через бериллиевое окно. Клубень картофеля моделировался сферой радиусом 3 см, состоящей из воды. Для оценки дозового распределения по глубине сфера была разбита на 12 слоев по 0.5 см. В результате моделирования двухстороннего облучения картофеля рентгеновскими лучами с учетом спектра тормозного излучения, рассчитанного с помощью программного комплекса GEANT 4, получено распределение мощности поглощенной дозы D от глубины проникновения рентгеновского излучения X (рис. 1).

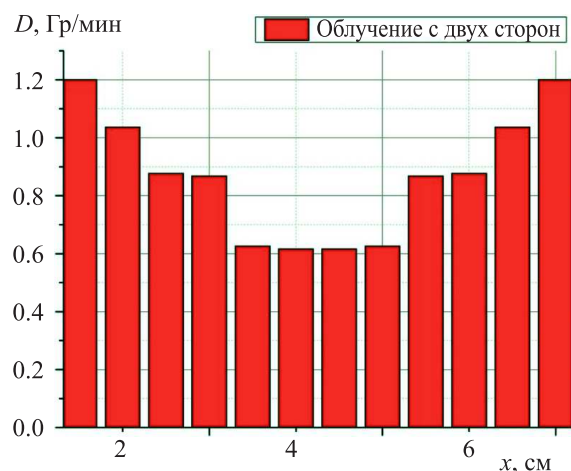


Рис. 1. Гистограмма распределения мощности дозы D с глубиной X при прохождении рентгеновского излучения через водяную сферу радиусом 3 см, облученную с двух диаметрально противоположных сторон

Вышеуказанные условия позволили рассчитать суммарную мощность поглощенной дозы в водяной сфере радиусом 3 см. Было установлено, что мощность дозы в клубне картофеля средней массой 120 г составляла примерно 0.01 Гр/с. Таким образом, при используемых экспозициях картофель облучали в дозах 2.4, 4.8, 9.6, 12, 14.4, 16.8, 19.2, 24, 30 Гр соответственно.

Как видно из рис. 1, поглощенная доза во внешних слоях сферы выше, чем во внутренних слоях. В клубнях картофеля глубина залегания проростков составляет от 2 до 5 мм в зависимости от сорта; таким образом, при данных характеристиках облучения точки роста картофеля были равномерно облучены.

1.3. Метод определения концентрации восстанавливающих сахаров с помощью динитросалициловой кислоты (ДНС)

Концентрацию восстанавливающих сахаров (ВС) в клубнях картофеля определяли колориметрическим методом с использованием динитросалициловой кислоты (ДНС). Из каждого картофельного клубня выделяли экстракт, который центрифугировали для выделения чистого сока и затем разбавляли в 20 раз дистиллированной водой. Далее в пропорции 1:3 в пробы с разбавленным экстрактом добавляли реагент ДНС и инкубировали на кипящей водяной бане в течение 5 мин. Пробы охлаждали до комнатной температуры и определяли их оптическую плотность с помощью спектрофотометра при длине волны 540 нм как превышение оптической плотности пробы с экстрактом над оптической плотностью фонового раствора реагента ДНС. Полученные данные оптических плотностей пересчитывались по калибровочным графикам в концентрацию восстанавливающих сахаров в г/л и строились зависимости концентрации восстанавливающих сахаров C от дозы облучения D для каждого этапа.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Прорастание клубней картофеля после воздействия рентгеновским излучением

Для исследования кинетики прорастания картофеля ежемесячно измеряли длину проростков облученных и контрольных клубней в течение всего эксперимента. По полученным значениям строились зависимости средней суммарной длины проростков, приходящейся на один клубень L/N , измеренной в различные периоды времени после проведения облучения для каждого этапа, от дозы облучения D .

На рис. 2 представлены зависимости суммарной длины проростков клубней, нормированных на количество клубней L/N , от дозы облучения D для всех четырех этапов обработки клубней рентгеновским излучением, измеренные через 7 мес после сбора урожая, т.е. в марте 2017 г. Видно, что с увеличением дозы облучения суммарная длина проростков,

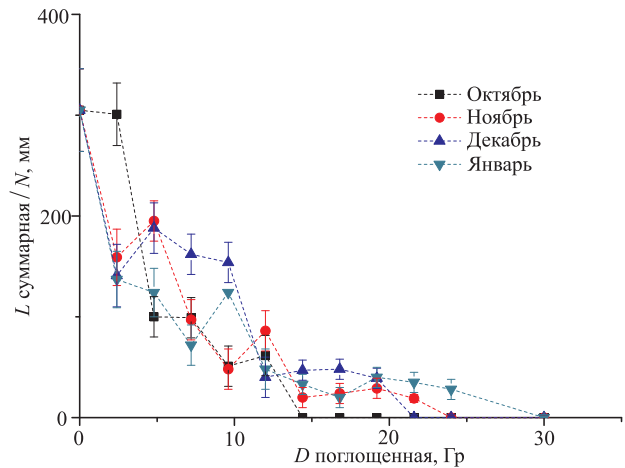


Рис. 2. Зависимость суммарной длины проростков, нормированных на количество клубней L/N , от дозы облучения D для всех четырех этапов обработки клубней рентгеновским излучением через 7 мес после сбора урожая

приходящаяся на один клубень, уменьшалась, причем дозовые зависимости носили нелинейный характер. Для клубней картофеля, облученных в октябре (этап 1), ингибирование прорастания наблюдалось при дозе облучения 15 Гр и более. Клубни картофеля, облученные в ноябре и декабре (этапы 2 и 3), не прорастали в течение всего времени наблюдения при дозах от 15 до 20 Гр и более. Для клубней, облученных в январе (этап 4), ингибирование прорастания наступало при дозе 30 Гр.

2.2. Связь концентрации восстанавливающих сахаров с кинетикой прорастания в контрольных необлученных клубнях

На рис. 3,а представлена зависимость концентрации восстанавливающих сахаров в зависимости от времени хранения контрольных (необлученных) клубней, а на рис. 3,б показана кинетика их прорастания в течение всего времени наблюдения.

Как видно из рис. 3,а, с октября по декабрь концентрация сахаров в клубнях практически не менялась и составляла порядка 2.0 ± 0.5 г/л, клубни в течение этого периода не прорастали (рис. 3,б). В январе наблюдался резкий скачок концентрации сахаров до 14 ± 1 г/л, что инициировало прорастание клубней (рис. 3,б). В феврале и марте концентрация восстанавливающих сахаров уменьшилась до исходных значений (рис. 3,а), картофель при этом продолжал прорастать. Так, спустя 7 мес хранения средняя длина проростков составляла около 186 ± 5 мм.

Видно, что концентрация сахаров в контрольных необлученных клубнях изменялась в течение всего времени наблюдения.

2.3. Концентрация восстанавливающих сахаров в клубнях, облученных в различные периоды хранения картофеля

На основании проведенных исследований с октября по декабрь 2016 г., т.е. спустя 3–5 мес

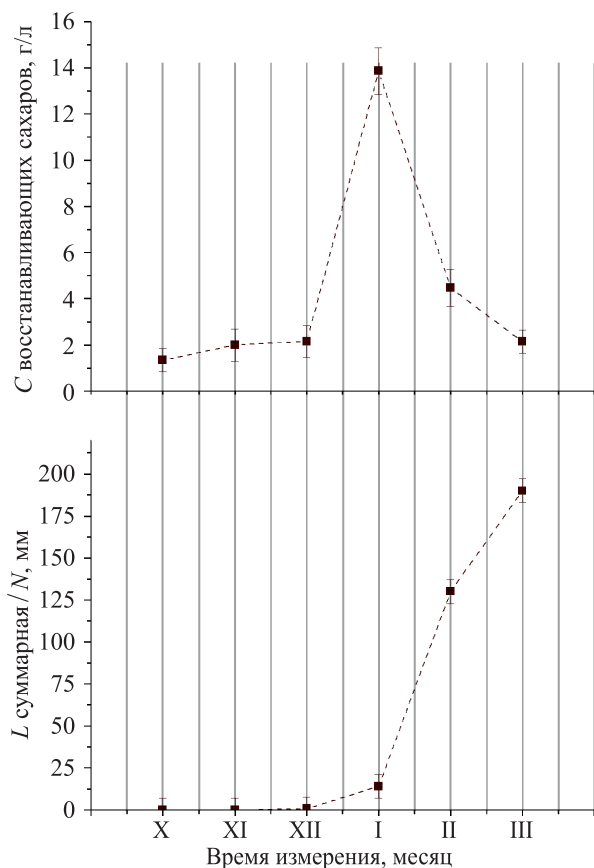


Рис. 3. а — Зависимость концентрации восстанавливающих сахаров C в необлученных клубнях от времени хранения картофеля t ; б — зависимость средней суммарной длины проростков, приходящейся на один контрольный клубень N/L , от времени хранения картофеля t

хранения, было установлено, что для первых трех этапов наблюдалось возрастание концентрации сахаров после проведения облучения по сравнению с контрольными образцами, причем максимальное возрастание происходило для каждого этапа спустя месяц после облучения. При этом явной дозовой зависимости в диапазоне доз от 2.4 до 30 Гр не наблюдалось. Однако к декабрю 2016 г. количество сахаров в клубнях, облученных в октябре, было практически такое же, как и у контрольных образцов ($\approx 2.0 \pm 0.3$ г/л). Максимальное отклонение от контрольных значений в указанном временном промежутке было зафиксировано в декабре 2016 г. у клубней, облученных в ноябре (до 8.0 ± 0.7 г/л), т.е. спустя месяц после облучения.

На рис. 4 представлены зависимости концентрации восстанавливающих сахаров в клубнях, облученных в октябре, ноябре, декабре и январе, измеренные в январе 2017 г. В январе количество сахаров в контрольных образцах достигло максимального значения 14 ± 1 г/л за все время наблюдения. Из рис. 4 видно, что количество сахаров в клубнях, облученных в январе, было в среднем выше, чем у контрольных значений, и достигало 21 ± 1 г/л. В клубнях, облученных в октябре и ноябре, концентрация сахаров колебалась в диапазоне от 2

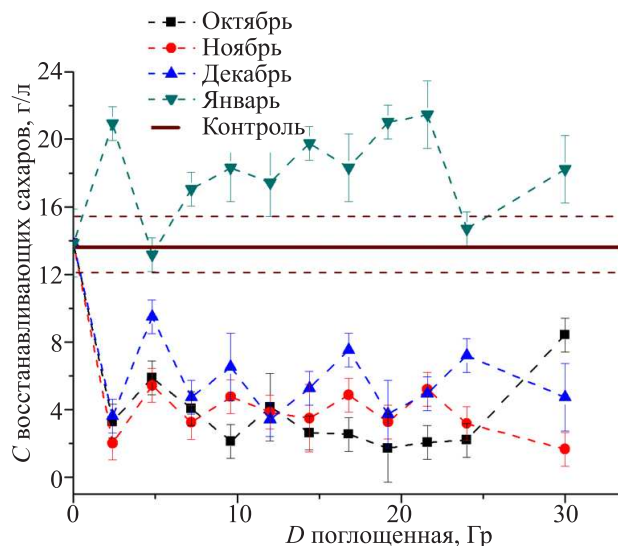


Рис. 4. Зависимости концентрации C восстанавливающих сахаров от поглощенной дозы D в клубнях, облученных в октябре, ноябре и декабре, измеренные в январе 2017 г.

до 5 г/л, для облученных в декабре — от 4 до 10 г/л. В феврале 2017 г. концентрация сахаров в облученных клубнях не превышала 6.0 ± 0.5 г/л, т.е. для клубней, облученных в январе, максимум восстанавливающих сахаров наблюдался сразу после облучения.

К марту 2017 г. все контрольные клубни проросли, при этом концентрация сахаров в конечной точке для них составила 2.0 ± 0.5 г/л. Концентрация сахаров облученных клубней, измеренная также в марте 2017 г., для всех четырех этапов колебалась в диапазоне от 0.9 до 3.4 г/л. Таким образом, можно утверждать, что к марту 2017 г., спустя 7 мес хранения, концентрация восстанавливающих сахаров в облученных и необлученных клубнях практически совпала в конечной точке измерения.

Заключение

В результате проведенного исследования было установлено, что воздействие рентгеновского излучения на клубни картофеля, собранные в августе и облученные в октябре, привело к остановке их прорастания в дозах 15 Гр и более в течение всего времени наблюдения. Клубни картофеля, облученные в ноябре и декабре, перестали прорастать в дозах 20 Гр, а облученные в январе — при 30 Гр. Таким образом, чем раньше проводится радиационная обработка клубней с целью ингибирования прорастания, тем в меньшей дозе можно проводить облучение.

Показано, что концентрация восстанавливающих сахаров в контрольных образцах урожая августа 2016 г. практически не менялась до декабря 2016 г. ($\approx 2.0 \pm 0.5$ г/л), затем наблюдался резкий скачок концентрации сахаров в январе до 14 ± 1 г/л и дальнейший спад в феврале и марте 2017 г. до первоначальных значений. Воздействие рентгеновского излучения привело к возрастанию концентраций

восстанавливающих сахаров в клубнях картофеля, облученных в различных дозах, причем максимум наблюдался через месяц после каждого облучения для клубней, облученных в октябре–ноябре. Максимальное значение концентрации восстанавливающих сахаров в них составило 9.7 ± 1 г/л. Для картофеля, облученного в январе, максимальное значение сахаров (21 ± 1 г/л) наблюдалось сразу после облучения, однако спустя месяц концентрация в них была близка к контрольным значениям. К марту 2017 г. концентрация восстанавливающих сахаров во всех облученных клубнях была близка к контрольным значениям для всех четырех этапов облучения в диапазоне доз от 2.4 до 30 Гр.

Итак, на основании экспериментальных данных можно сделать вывод, что концентрация восстанавливающих сахаров в клубнях картофеля, облученных рентгеновским излучением спустя 2–4 мес после сбора урожая, колебалась в диапазоне от 0.9 до 9.7 г/л, в то время как для контрольных необлученных клубней этот показатель лежал в диапазоне от 2 до 14 г/л в течение всего времени наблюдения. Радиационная обработка спустя 5 мес после сбора картофеля приводит к возрастанию концентрации сахаров, превышающей концентрацию в необлученных клубнях в течение всего времени наблюдения,

что говорит о нецелесообразности радиационной обработки картофеля более чем через 4 мес после сбора урожая.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-016-00198 А).

Список литературы

1. Nouri J., Toofanian F. // Pakistan J. Biosci. 2001. **4**. P. 1275.
2. Frazier M.J. et al. // Amer. J. of Potato Research. 2006. **83**.1. P. 31.
3. Ghanekar A.S., Padwal-Dessi S.R., Nadkarni G.B. // J. Agr. Food Chem. 1983. **31**. P. 1009.
4. Schwimmer S. et al. // J. Amer. Potat. 1957. **34**. P. 31.
5. Rezaee M. et al. // J. Agr. Sci. Tech. 2011. P. 829.
6. Neelma M. et al. // Pak. J. Life Soc. Sci. 2015. 13(3). P. 153.
7. Abd El-Moneim et al. // Asian Pacific J. of Tropical Biomedicine. 2012. P. 772.
8. Abd El-Moneim et al. // Not.Bot. Horti Agrobi. 2012. **40**(2). P. 129.
9. Hayashi T., Todoriki S. // JAERI-Conf. 2002. **13**. P. 100.
10. Hayashi T., Todoriki S. // Radiation Physics and Chemistry. 2000. **57**. I, N 3–6. P. 253.
11. Алимов А.С., Близняк У.А., Борщеговская П.Ю. и др. // Известия РАН. 2017. **81**, № 4. С. 43.

An investigation of the effects of X-ray treatment on the concentration of reducing sugars in potatoes and their sprouting

V. M. Avdyukhina¹, U. A. Bliznyuk^{2,a}, P. Yu. Borschegovskaya², A. V. Buslenko², A. S. Ilyushin¹, E. G. Kondratieva³, G. A. Krusanov², I. S. Levin¹, A. P. Sinitsyn³, F. R. Studenikin^{2,b}, A. P. Chernyaev^{2,4}

¹Department of solid state physics, ²Department of Accelerators' Physics and Radiation Medicine, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

³Department of Chemical Enzymology, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

⁴Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia. Russia, 119234, Moscow, Leninsky Gory, 1/2 E-mail: ^auabliznyuk@gmail.com, ^bf.studenikin@gmail.ru.

This study investigates the effect of X-rays on potato tubers to stop their sprouting at different periods of storage. It has been found that there is a connection between the period of storage and the dose of irradiation. To control the quality of the irradiated tubers, the concentration of reducing sugars was measured during the entire experiment and compared to the parameters of non-irradiated potato tubers.

Keywords: X-ray irradiation, inhibition of potato sprouting, reducing sugars.

PACS: 87.53.-j.

Received 30 June 2017.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **72**, No. 3. Pp. 334–338.

Сведения об авторах

1. Авдюхина Валентина Михайловна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-46-10, e-mail: vmaphys@gmail.com.
2. Близняк Ульяна Александровна — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: uabliznyuk@gmail.com.
3. Борщеговская Полина Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: alexeevapo@mail.ru.
4. Бусленко Анна Владимировна — выпускник бакалавриата; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: anyabuslenko@gmail.com.
5. Илюшин Александр Сергеевич — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-30-29, e-mail: sols146i@phys.msu.ru.
6. Кондратьева Елена Геннадьевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: elgenkon@inbox.ru.
7. Крусанов Григорий Андреевич — аспирант; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: krusanov@physics.msu.ru.
8. Левин Иван Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-46-10, e-mail: is.levin@physics.msu.ru.
9. Синицын Аркадий Пантелеймонович — доктор химических наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-59-66, e-mail: apsinityn@gmail.com.
10. Студеникин Феликс Рикардович — выпускник бакалавриата; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: f.studenikin@gmail.com.
11. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: a.p.chernyaev@yandex.ru.