

Моделирование воздействия ускоренных электронов на микробиологические показатели рыбы после проведения радиационной обработки

А. П. Черняев^{1,2}, В. М. Авдюхина¹, У. А. Близнюк^{1,*}, П. Ю. Борщеговская¹, И. К. Гордонова³, В. С. Ипатова¹, В. А. Леонтьев¹, З. К. Никитина³, В. В. Розанов¹, Ф. Р. Студеникин¹, Д. С. Юров²

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

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

³Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений. Россия, 117216, ул. Грина, д. 7, стр. 1

(Статья поступила 18.03.2020; подписана в печать 19.03.2020)

Представлены результаты математического моделирования экспериментального исследования по воздействию различных доз электронов с энергией 1 МэВ на концентрацию бактерий в гомогенате фарша форели в течение 15-ти суток ее хранения при температуре (2 – 4) °С. Установлено, что предложенная математическая модель, основанная на классической модели «хищник-жертва», описывающая изменение численности двух видов популяций бактерий, находящихся в условиях ограниченного питательного ресурса, от времени, хорошо согласуется с экспериментально полученными зависимостями изменения концентрации жизнеспособных клеток в гомогенате рыбного фарша после воздействия ускоренных электронов в различных дозах.

PACS: 87.53.-j УДК: 539.1.047

Ключевые слова: радиационная обработка продуктов питания, математическая модель «хищник-жертва», популяция, ионизирующее излучение.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день задача обеспечения безопасности и качества продуктов питания является актуальной. Несоответствие продуктов санитарно-гигиеническим нормам, связанное с микробной обсемененностью, может оказать токсическое воздействие на организм человека и послужить причиной инфекционных заболеваний [1]. Применяемые в настоящее время методы термической и химической обработки пищевой продукции сопряжены с такими негативными побочными эффектами как нарушением органолептической целостности продукции, загрязнением продукта вредными веществами и, как следствие, отрицательным влиянием на здоровье и жизнедеятельность человека [2].

Одним из наиболее эффективных и безопасных методов обработки пищевой продукции, позволяющим резко снизить или даже исключить использование химических препаратов, является применение радиационных технологий [3, 4]. Данная технология основана на поражающем действии ионизирующего излучения на ключевые структуры микроорганизмов, подавляющем их размножение [5], и тем самым позволяющая снизить содержание патогенов в продуктах питания до безопасного уровня [6, 7, 8].

Сложность жизненного цикла микроорганизмов как биологических систем определяет многообразие радиобиологических эффектов после воздействия различных доз ионизирующего излучения. С целью прогнозирова-

ния срока годности продукции используют математические модели, позволяющие достаточно точно описать рост популяций бактерий [9, 10, 11]. В микробиологии закономерности, лежащие в основе математических моделей кинетики роста популяций микроорганизмов, закладывались в работах Лотка и Вольфтера [12]. Начиная с 60-х годов XX в., исследуются математические модели, использующие различные функции для описания взаимодействия популяций в различных условиях [13, 14, 15]. В таких моделях помимо обыкновенных дифференциальных уравнений часто применяют уравнения с запаздыванием, разностные уравнения, уравнения в частных производных, стохастические модели и т.д. [16]. На параметры математической модели оказывают влияние различные факторы, такие как выбор объектов исследования, их взаимодействие друг с другом, внешние воздействия и т.д. Корректно построенная модель дает возможность спрогнозировать динамику изменения параметров системы и получить важные качественные результаты [17].

В настоящее время актуальной является задача математического моделирования кинетики изменения концентрации микроорганизмов в продуктах питания в течение периода хранения после проведения радиационной обработки продукции.

В настоящей работе предложено математическое моделирование изменения концентрации бактерий различных популяций в условиях ограниченного пространства с течением времени после воздействия различных доз ионизирующего излучения, построенное на основе экспериментального исследования кинетики микробиологических показателей гомогената фарша форели в течение 15-ти суток хранения продукта после

*E-mail: uabliznyuk@gmail.com

проведения его радиационной обработки ускоренными электронами в различных дозах.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Была исследована общая концентрация жизнеспособных клеток в гомогенате фарша форели после радиационной обработки ускоренными электронами в различных дозах в течение 15-ти суток хранения продукта при температуре (2 – 4)°С. Образцы гомогената фарша форели объемом 0.5 мл, помещенные в пробирки типа Эппендорф объемом 2 мл, облучали на ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с энергией 1 МэВ, разработанного в НИИЯФ МГУ имени Д.В. Скобельцына. Поглощенные гомогенатом фарша дозы определялись с помощью ферросульфатного метода дозиметрии. Дозы, поглощенные образцами, составили 0.24 кГр, 0.48 кГр, 0.96 кГр, 2.8 кГр и 5.6 кГр.

После облучения каждые три дня осуществлялся мониторинг микробиологических показателей облученных и контрольных образцов, которые хранились в течение 15 суток при температуре (2 – 4)°С.

На рис. 1 представлен график зависимости концентрации жизнеспособных клеток в образцах, облученных в пяти различных дозах, и в контрольных необлученных образцах в зависимости от времени после воздействия электронным излучением.

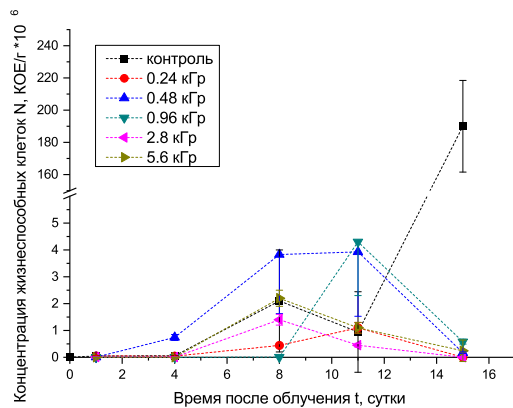


Рис. 1: Зависимость общей концентрации жизнеспособных клеток в облученных и контрольных образцах от времени после воздействия ускоренными электронами в различных дозах

Из рис. 1 видно, что зависимость общей концентрации жизнеспособных клеток в облученных и контрольных образцах от времени хранения носит немонотонный характер. По результатам мониторинга микробиологических показателей гомогената фарша форели было получено, что спустя 15 суток хранения образцов обсемененность контрольных образцов почти в 200 раз превысила предельно допустимый показатель концентрации микроорганизмов (10^6 КОЕ/г), в то время

как показатели образцов, облученных в диапазоне доз 0.24 – 5.6 кГр, лежали ниже 10^6 КОЕ/г.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Математическое описание поведения кривых выживаемости различных популяций бактерий в условиях рыбного гомогената фарша, обработанного электронами в различных дозах, базировалось на основе классической соревновательной модели Лотки-Вольтера [12].

Исходя из немонотонного поведения экспериментальных зависимостей концентрации бактерий от времени после воздействия ионизирующим излучением (рис. 1), можно сделать предположение о наличии как минимум двух популяций микроорганизмов, присутствующих в гомогенате рыбного фарша. Рассмотрим ограниченное пространство, в котором существуют только две популяции бактерий. Считаем, что других видов бактерий в течение всего времени наблюдения не обнаруживается, а существующие две популяции находятся в условиях ограниченного количества питательных веществ.

Пусть все бактерии первого вида N_1 могут взаимодействовать со всеми бактериями второго вида N_2 , тогда количество потенциальных взаимодействий бактерий пропорционально N_1N_2 . Взаимодействия могут иметь разные последствия для обеих популяций. Если бактерии являются симбионтами, то их взаимодействия взаимовыгодны, что приведет к увеличению численности обоих видов. При взаимоотношениях типа «хищник-жертва» один вид будет уменьшаться в численности, а другой — увеличиваться. При прямой конкуренции оба вида будут уменьшаться в численности [18].

Запишем систему уравнений, описывающих изменение численности двух изолированных от внешних факторов популяций в ограниченной питательной среде с течением времени t :

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \alpha_1 N_1 (F - b_1 N_1 - b_2 N_2) + g_1 N_1 N_2, \\ \frac{dN_2}{dt} = \alpha_2 N_2 (F - b_1 N_1 - b_2 N_2) + g_2 N_1 N_2, \\ \frac{dF}{dt} = -\gamma (b_1 N_1 + b_2 N_2), \end{cases} \quad (1)$$

где N_i — общее количество бактерий популяции вида i , α_i — коэффициент размножения популяции i -ого вида, b_i — коэффициент, характеризующий скорость потребления питательных веществ одной бактерией популяции i -ого вида, F — безразмерная величина, пропорциональная среднему количеству питательных веществ, находящихся в области досягаемости для одной клетки. Если $F > bN$, то питательная среда может обеспечить увеличение численности популяции; если $F < bN$, то питательная среда «перенаселена», и общее число бактерий уменьшится; если $F = bN$, то

питательная среда «насыщена», и численность бактерий не изменится. Коэффициент γ характеризует зависимость скорости уменьшения количества питательных веществ за счет потребления их бактериями, g_i — коэффициент, описывающий характер взаимодействия популяций, а его модуль — интенсивность, $i = 1, 2$.

Определим область значений для параметров построенной модели. Из рис. 1 видно, что зависимость общего количества жизнеспособных клеток контрольного образца от времени имеет два пика на 8-ые и 15-ые сутки. Кроме того, исходя из уменьшения суммарной численности бактерий между двумя пиками, можно сделать вывод об уменьшении численности хотя бы одного вида бактерий. Предположим, что бактерии вида 1, используя свое преимущество в исходной численности N_1 и/или скорости размножения α_1 , в первые сутки наблюдения заняли большую часть пространства питательной среды, достигнув максимума на 8 сутки, но при взаимодействии с бактериями вида 2 к 15-ым суткам были практически полностью уничтожены, уступив бактериям вида 2 почти все пространство питательной среды. Видно, что по сравнению с видом 1, вид 2 достиг гораздо большей численности на 15 сутки, что позволяет сделать вывод о пренебрежимо малой зависимости вида 2 от объема питательной среды. Тогда динамика бактерий вида 2 будет описываться стандартной экспоненциальной зависимостью.

Система уравнений (1) в упрощенном виде с учетом вышеуказанных предположений:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \alpha_1 N_1 (F - b_1 N_1) + g_1 N_1 N_2 \\ \frac{dN_2}{dt} = \alpha_2 N_2 \\ \frac{dF}{dt} = -\gamma b_1 N_1 \end{cases} \quad (2)$$

Тогда система уравнений (2) с учетом решения для популяции N_2 представима как:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \alpha_1 N_1 (F - b_1 N_1) + g_1 N_1 N_2 \\ N_2(t) = N_2(t_0) \exp(\alpha_2(t - t_0)) \\ \frac{dF}{dt} = -\gamma b_1 N_1 \end{cases} \quad (3)$$

Величины F , γ и b имеют абстрактный характер и могут быть умножены на произвольный множитель. Не ограничивая общности, положим $F(t_0) = 1$, $\gamma = 1$.

Таким образом, для того чтобы полностью задать модель, необходимы значения следующих параметров: $N_1(t_0)$, $N_2(t_0)$, α_1 , α_2 , b_1 , g_1 . Для решения системы (3) использовался метод Рунге–Кутта 4-го порядка. Были получены зависимости $N_1(t, N_1(t_0), N_2(t_0), \alpha_1, \alpha_2, b_1, g_1)$ и $N_2(t, N_1(t_0), N_2(t_0), \alpha_1, \alpha_2, b_1, g_1)$, которые аппроксимировали экспериментальные данные. Исходя из экспериментальных данных (рис. 1), для каждой дозы и контрольных образцов можно использовать 6 экспериментальных точек $N_i(t_i)$, соответствующих измерениям концентрации жизнеспособных клеток в фарше

через каждые 3 суток после проведения облучения, что позволяет записать систему из 6-ти уравнений вида:

$$N_1(t_i, N_1(t_0), N_2(t_0), \alpha_1, \alpha_1, b_1, g_1) + N_2(t_i, N_1(t_0), N_2(t_0), \alpha_1, \alpha_1, b_1, g_1) - y_i = 0, \quad (4)$$

где $i = 1, 2, \dots, 6$.

Далее, используя метод наименьших квадратов с весами в качестве погрешностей экспериментальных данных, были определены значения параметров $N_1(t_0)$, $N_2(t_0)$, α_1 , α_2 , b_1 , g_1 , дающие наилучшее приближение к экспериментальным данным.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены рассчитанные значения параметров $N_1(t_0)$, $N_2(t_0)$, α_1 , α_2 , b_1 , g_1 для контрольных образцов и образцов, облученных в различных дозах. Для каждой построенной модели для различных доз были посчитаны коэффициенты корреляции $R_{\text{корр}}$, значения которых также указаны в табл. 1.

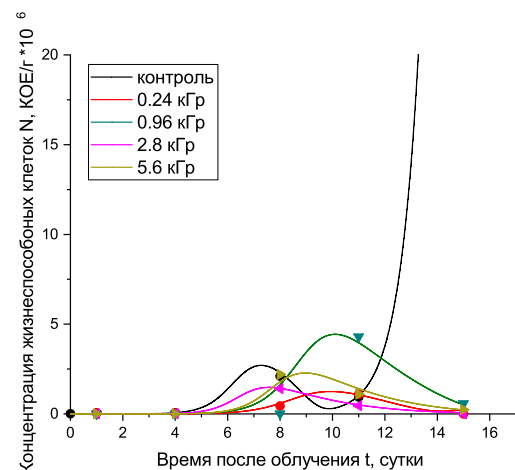


Рис. 2: Рассчитанные зависимости общей концентрации бактерий от времени

Исходя из данных табл. 1 построена зависимость изменения общей концентрации бактерий, находящихся в ограниченном пространстве от времени, в соответствии с экспериментальным данным для гомогената фарша форели для различных доз облучения (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что подбор параметров построенной математической модели был сделан корректно. Действительно, кривые также носят немонотонный характер, а их вид совпадает с экспериментальными данными с коэффициентами корреляциями, представленными в табл. 1 (последний столбец).

Для образца, облученного в дозе 0.48 кГр, не было найдено удовлетворительного решения. Это связано с большими погрешностями концентрации жизнеспособных клеток, экспериментально установленными на

Таблица 1: Рассчитанные параметры математической модели

Доза, кГр	$N_1(t_0)$, КОЕ/г·10 ⁻⁵	$N_2(t_0)$, КОЕ/г·10 ⁻⁷	α_1 , 1/сутки	α_2 , 1/сутки	b_1 , г/КОЕ	g_1 , г/(КОЕ·сутки)	$R_{\text{корр}}$
0 (к)	6	6.01	1.77	1.30	0.2	25.9	0.99
0.24	0.81·6	0.451·6.01	0.7·1.77	0.61·1.30	2.0·0.2	1.01·25.9	0.99
0.48			нет удовлетворительного решения				
0.96	0.74·6	0.452·6.01	0.77·1.77	0.59·1.30	0.6·0.2	0.99·25.9	0.89
2.8	0.42·6	0.449·6.01	1.77	0.595·1.30	0.2	0.98·25.9	0.99
5.6	0.25·6	0.45·6.01	0.9·1.77	0.58·1.30	1.25·0.2	1.02·25.9	0.96

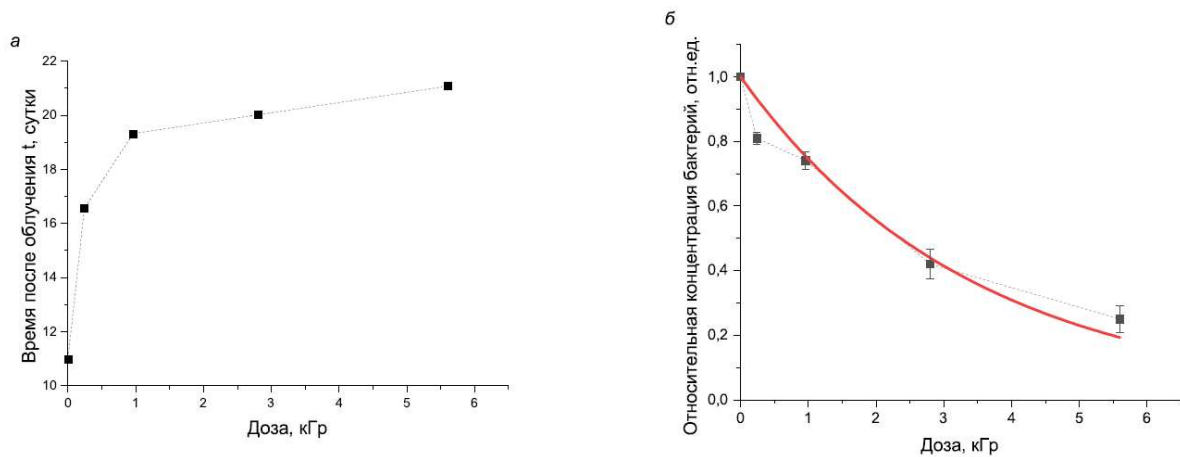


Рис. 3: *а* — Зависимость времени после воздействия электронным излучением, когда общая концентрация бактерий превышает $5 \cdot 10^6$ КОЕ/г, от дозы. *б* — Зависимость относительного количества бактерий в образцах, от дозы сразу после облучения

8 – 11 сутки для данной дозы, из-за которых подбор параметров математической модели может принимать обширный набор значений.

Построенная модель дает возможность рассчитать, на какие сутки для образцов, облученных в различных дозах, количество бактерий превысит предельно допустимый уровень обсеменности рыбного фарша. Получено, что при увеличении дозы облучения время достижения критического уровня увеличивается, т.е. увеличивается срок хранения облученного фарша форели с увеличением дозы облучения (рис. 3, *а*). Так, при дозе 0.24 кГр срок хранения форели увеличивается до 17 суток по сравнению с 12-тью сутками для необлученного фарша, а при дозе 5.6 кГр — до 21 суток.

Так же была построена зависимость относительной концентрации жизнеспособных клеток популяции вида 1 $N_1/N_{1,0}$ от дозы сразу после облучения (рис. 3, *б*).

Из рис. 3, *б* видно, что концентрация выживших бактерий популяции $N_1(t_0)$ монотонно снижается с увеличением дозы облучения, что соответствует экспериментально полученной зависимости количества жизнеспособных клеток от дозы облучения, которая хорошо аппроксимируется функцией вида e^{-aD} , где a — константа, D — доза облучения. Параметры $N_2(t_0)$ и α_2 , прак-

тически не меняются в диапазоне доз 0.24–5.6 кГр. Полученный результат можно объяснить тем, что за второй популяцией бактерий вероятно скрывается два вида бактерий. При облучении один из этих видов практически полностью подавляется, а второй относительно не чувствителен к излучению. Таким образом, в сумме общее количество бактерий двух популяций не меняется, при этом их общая скорость размножения от дозы так же остается постоянной, так как один вид практически исчезает, а скорость размножения другой от дозы не зависит. Либо можно предположить, что в данном диапазоне доз облучений данный вид бактерий является радиоустойчивым. Однако, исходя из литературных данных следует, что ингибирующие дозы большинства исследуемых бактерий, находящихся в рыбной продукции, лежат ниже 6 кГр [19, 20, 21, 22]. Из рис. 2 видно, что коэффициент размножения бактерий вида 1 α_1 при дозах 0.24 кГр и 0.96 кГр практически не меняется, а затем с увеличением дозы облучения возрастает. Можно предположить, что при относительно небольших дозах повреждения, наносимые клеткам излучением, отрицательно влияют на скорость роста численности, но не являются летальными. При больших дозах практически все поврежденные

клетки погибают, остаются только самые устойчивые, способные к размножению, тем самым не уменьшается скорость роста популяции. Коэффициент g_1 , характеризующий изменение численности обеих популяций за счет их взаимодействия, практически не изменился, что говорит о том, что интенсивность взаимодействий мало зависит от дозы облучения. Характер зависимости коэффициента b_1 , характеризующего скорость потребления питательных веществ одной бактерией вида 1, от дозы носит нелинейный характер, при дозе 0.24 кГр он увеличивается, что может говорить о специфическом ответе бактерий на относительно небольшое воздействие ионизирующим излучением, затем уменьшается с увеличением дозы, а при дозе облучения 5.6 кГр возрастает, что может быть связано с тем, что при больших дозах остаются только самые устойчивые бактерии из популяции, скорость потребления ими питательных веществ может возрастать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель, основанная на классической модели «хищник-жертва», описыва-

ющая изменение численности двух видов популяций бактерий, находящихся в условиях ограниченного питательного ресурса, от времени, хорошо согласуется с экспериментально полученными зависимостями изменения концентрации жизнеспособных клеток в гомогенате рыбного фарша после воздействия ускоренных электронов в различных дозах. Построение таких популяционных моделей может служить для оценки сроков хранения продуктов, прошедших радиационную обработку. Также представляется интересным проведение модельного эксперимента по исследованию выживаемости двух и более заранее известных популяций бактерий на питательной среде с целью исследования их поведения после воздействия ионизирующим излучением в различных дозах в течение длительного времени хранения для дальнейшего совершенствования модели прогнозирования сроков хранения пищевой и сельскохозяйственной продукции, прошедшей радиационную обработку.

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

-
- [1] *Зайцева Н. В., Тутельян В. А., Шур П. З., Хотимченко С. А., Шевелева С. А.* // Гигиена и санитария. 2014. **93**, №. 5. С. 70.
- [2] *Хотимченко С. А., Бессонов В. В., Багрянцева О. В., Гмошинский И. В.* // Медицина труда и экология человека. 2015. №. 4. С. 7.
- [3] *Мусина О. Н., Коновалов К. Л.* // Пищевая промышленность. 2016. №. 8. С. 46.
- [4] *Черняев А. П.* Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина. Книжный дом «Университет». М., 2018.
- [5] *Черняева А. П.* Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. ФИЗМАТЛИТ. М., 2004.
- [6] *Алексахин Р. М., Санжарова Н. И., Козьмин Г. В., Павлов А. Н., Гераськин С. А.* // Вестн. РАН. 2014. №. 1. С. 78.
- [7] *Чиж Т. В., Козьмин Г. В., Полякова Л. П., Мельникова Т. В.* // Вестн. РАЕН. 2011. **11**, №. 4. С. 44.
- [8] Кодекс Алиментариус. Облученные продукты питания. Весь мир. М., 2004.
- [9] *Ram Y., Dellus-Gur E., Bibi M., Karkare K., Obolski U., Feldman M. W., Cooper T. F., Berman J., Hadany L.* // PNAS. 2019. **116**, №. 29. P. 14698.
- [10] *Alonso A. A., Molina I., Theodoropoulos C.* // Applied and Environmental Microbiology. 2014. **80**, №. 17. P. 5241.
- [11] *Baranyi J., Roberts T. A.* // Int. J. Food Microbiol. 1994. **23**. P. 277.
- [12] *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование / Пер. с франц. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1976.
- [13] *Романов М. Ф., Федоров М. П.* Математические модели в экологии. СПб.: Иван Федоров, 2003.
- [14] *Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б.* Биофизическая динамика продукционных процессов. М.: Ин-т компьютер. Технологий, 2004.
- [15] *Wiser M. J., Lenski R. E.* // PLoS One. 2015. **10**, №. 5. e0126210.
- [16] *Александров А. Ю., Платонов А. В., Старков В. Н., Степенко Н. А.* Математическое моделирование и исследование устойчивости биологических сообществ: учеб. пособие. СПб.: Изда-во «Лань», 2016.
- [17] Модели динамики популяций: учеб. пособие. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2018.
- [18] *Константинов В. М., Резанов А. Г., Фадеева Е. О.* Общая биология: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / под ред. В.М. Константинова. 5-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2008.
- [19] *Ioannis S. Arvanitoyannis* Irradiation of Food Commodities: Techniques, Applications, Detection, Legislation, Safety and Consumer Opinion. Food microbiology, 2010.
- [20] *Mahmoud B. S. M.* // Food microbiology. 2009. **26**, №. 8. P. 860.
- [21] *Arvanitoyannis I. S., Stratakos A., Mente E.* // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2009. **49**, №. 1. P. 68.
- [22] *Belbe G. M., Tofana M.* // Bulletin UASVM Agriculture. 2010. **67**, №. 2. P. 178.

Modeling of electron irradiation treatment on kinetics of bacterial content in minced fish

**A. P. Chernyaev^{1,2}, V. M. Avdyukhina¹, U. A. Bliznyuk^{1,a},
P. Yu. Borchegovskaya¹, I. K. Gordonova³, V. S. Ipatova¹,
V. A. Leontyev¹, Z. K. Nikitina³, V. V. Rosanov¹,
F. R. Studenikin¹, D. S. Yurov²**

¹*Department of Physics of Accelerators and Radiation Medicine, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119191, Russia*

³*Russian Research Institute of Medical and Aromatic Plants, Moscow 117261, Russia*

E-mail: ^auabliznyuk@gmail.com

This study illustrates the mathematical modeling of the experimental study on the impact of 1 MeV electrons at different doses on the concentration of bacteria in the homogenate of minced trout during 15 days of storage at a temperature of (2-4)°C. A mathematical model was constructed based on the general predator-prey model, which describes the change in the number of two species of bacterial populations under conditions of a limited nutrient resource over time. This model agrees well with the experimentally obtained dependences of the change in the concentration of viable cells in minced fish homogenate after exposure to accelerated electrons in various doses.

PACS: 87.53.-j.

Keywords: irradiation treatment of foods, mathematical model, population, ionizing radiation.

Received 18 March 2020.

Сведения об авторах

1. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. каф., зав. лаб.; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: a.p.chernyaev@yandex.ru.
2. Авдюхина Валентина Михайловна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-46-10, e-mail: vmaphys@gmail.com.
3. Близнюк Ульяна Александровна — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: uabliznyuk@gmail.com.
4. Борщеговская Полина Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: alexeevapo@mail.ru.
5. Гордонова Ирина Константиновна — вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: nikitinaz@yandex.ru.
6. Ипатова Виктория Сергеевна — магистрант; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: vikki@dolg.su.
7. Леонтьев Валерий Андреевич — студент; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: vleon-98@yandex.ru.
8. Никитина Зоя Кимовна — доктор биол. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: nikitinaz@yandex.ru.
9. Розанов Владимир Викторович — доктор биол. наук, профессор; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: vrozanov@mail.ru.
10. Студеникин Феликс Рикардович — аспирант, инженер; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: f.studenikin@gmail.com.
11. Юров Дмитрий Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: dyurov88@mail.ru