ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2404
https://elibrary.ru/EPYPHL

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Показатели качества *Agaricus bisporus* после обработки УФ-излучением

В. В. Кондратенко, Н. Е. Посокина*, Н. И. Федянина, О. В. Карастоянова, Н. В. Коровкина

Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, Видное, Россия

Поступила в редакцию: 28.03.2022
Принята после рецензирования: 13.05.2022
Принята к публикации: 07.06.2022

**Н. Е. Посокина: Labtech45@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7857-6785*
В. В. Кондратенко: https://orcid.org/0000-0002-0913-5644
Н. И. Федянина: https://orcid.org/0000-0002-1665-5445
О. В. Карастоянова: https://orcid.org/0000-0001-7247-7519
Н. В. Коровкина: https://orcid.org/0000-0002-4108-5835

© В. В. Кондратенко, Н. Е. Посокина, Н. И. Федянина, О. В. Карастоянова, Н. В. Коровкина, 2022

Аннотация.
Для увеличения сроков хранения растительных объектов широко применяется обработка ультрафиолетовым (УФ) излучением. Под его воздействием замедляются изменения показателей качества сырья, определяющих его хранимоспособность. Цель исследования заключалась в установлении качественных показателей (маркеров) шампиньонов (*Agaricus bisporus*), значимо изменяющихся под воздействием УФ-излучения.
В качестве объектов были выбраны свежие шампиньоны, помещенные в пластиковые лотки и запаянные в полимерные пакеты. Образцы грибов обрабатывали УФ-излучением в диапазонах А, В, С и хранили 16 суток в холодильной камере при температуре 4 ± 2 °С. По истечении срока хранения определяли показатели качества шампиньонов. Полученные данные проанализировали с помощью парного двухвыборочного теста с определением равенства или неравенства дисперсий в повторностях и равенства или неравенства средних при заданной вероятности ошибки (α).
Экспериментально установили лабильные к воздействию УФ-излучением различных диапазонов маркеры, характеризующие деградацию растительной ткани шампиньонов, в процессе хранения по показателям качества (текстура, влагосодержание, убыль массы, содержание растворимых сухих веществ, pH, светлота и цветовое отличие). Разработали подход определения значимо изменяющихся показателей качества грибов. Установили значения расчетных вероятностей различий по каждому показателю. Определили диапазоны доз, влияющие на изменение качественных показателей грибов для каждого диапазона УФ-излучения при α = 0,05 и 0,1. Значимыми показателями являются: в диапазоне А от 327,8 до 800,0 Дж/м^2 при α = 0,05 – все исследуемые показатели, от 219,5 до 800,0 Дж/м^2 при α = 0,1 – все, кроме убыли массы; в диапазоне В от 104,6 до 200,0 Дж/м^2 при α = 0,05 – pH, цветовое отличие и светлота, от 172,2 до 200,0 Дж/м^2 при α = 0,1 – все, кроме убыли массы и текстуры; в диапазоне С от 412,4 до 439,5 Дж/м^2 и от 755,9 до 800,0 Дж/м^2 при α = 0,05 – pH, цветовое отличие и светлота, от 363,3 до 486,2 Дж/м^2 и от 728,2 до 800,0 Дж/м^2 при α = 0,1 – все показатели. Разработанный метод дает возможность аналитического определения диапазонов интенсивности внешнего воздействия, при которых анализируемый показатель будет значимо или не значимо изменяться.

Ключевые слова. А, В, С-диапазоны, дозы, маркеры, двухвыборочный тест, грибы, растительное сырье, свойства, хранение

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию Федерального исследовательского центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, тема FNEN-2019-00011.

Для цитирования: Показатели качества *Agaricus bisporus* после обработки УФ-излучением / В. В. Кондратенко [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 762–774. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2404

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2404
https://elibrary.ru/EPYPHL

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Quality Indicators of *Agaricus bisporus* after Ultraviolet Treatment

Vladimir V. Kondratenko, Natalia E. Posokina*, Natalia I. Fedyanina, Olga V. Karastoyanova, Nadezhda V. Korovkina

All-Russian Research Institute of Canning Technology, Vidnoe, Russia

Received: 28.03.2022
Revised: 13.05.2022
Accepted: 07.06.2022

**Natalia E. Posokina: Labtech45@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7857-6785*
Vladimir V. Kondratenko: https://orcid.org/0000-0002-0913-5644
Natalia I. Fedyanina: https://orcid.org/0000-0002-1665-5445
Olga V. Karastoyanova: https://orcid.org/0000-0001-7247-7519
Nadezhda V. Korovkina: https://orcid.org/0000-0002-4108-5835

© V.V. Kondratenko, N.E. Posokina, N.I. Fedyanina, O.V. Karastoyanova, N.V. Korovkina, 2022

Abstract.
Ultraviolet treatment increases the shelf life of plant products. It inhibits the changes in the quality indicators of raw materials that are responsible for storage capacity. The research objective was to establish qualitative indicators for champignons (*Agaricus bisporus*) after ultraviolet treatment.
Fresh champignons were placed in plastic trays and sealed in plastic bags. The samples were treated with ultraviolet radiation in ranges A, B, and C. After that, they were stored in a refrigerator at 4 ± 2°C for 16 days, i.e., until the end of storage period. The quality indicators underwent a paired two-sample test, which defined the equality/inequality of variances in replicates and equality/inequality of means at a given error probability (α).
The obtained indicators characterized the degradation of mushroom plant tissue after ultraviolet treatment during storage: texture, moisture content, weight loss, soluble solids, pH, lightness, and color. The authors developed a new approach to determine significant changes in the quality indicators and estimated probability values. For each range, they established the most effective dose at α = 0.05 and 0.1. All the indicators proved significant for range A samples at 327.8–800.0 J/m^2 and α = 0.05; all indicators were significant except weight loss in the range from 219.5 to 800.0 J/m^2 at α = 0.1. For range B samples, pH, color, and lightness were significant at 104.6–200.0 J/m^2 and α = 0.05; all but mass loss and texture were significant at 172.2–200.0 J/m^2 and α = 0.1. For range C samples, pH, color, and lightness were significant at 412.4–439.5 J/m^2 and 755.9–800.0 J/m^2 at α = 0.05; all indicators were significant at 363.3–486.2 J/m^2 and 728.2–800.0 J/m^2 at α = 0.1.
The new analytical method made it possible to determine the ranges of external effect intensity, in which the changes in the indicator were significant or insignificant.

Keywords. A, B, C-bands, doses, markers, two-sample test, mushrooms, plant materials, properties, storage

Funding. The research was part of state order from the V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, project No. FNEN-2019-00011.

For citation: Kondratenko VV, Posokina NE, Fedyanina NI, Karastoyanova OV, Korovkina NV. Quality Indicators of *Agaricus bisporus* after Ultraviolet Treatment. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):762–774. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2404

Введение

Существует взаимосвязь показателей качества и путей воздействия для снижения интенсивности процессов при длительном хранении объектов растительного происхождения. Поэтому необходимо выбрать наиболее лабильные показатели качества, которые с большей скоростью достигают своего критического значения. Исследования были проведены на примере шампиньонов как объектов с небольшим сроком хранения.

Шампиньоны (*Agaricus bisporus*) являются наиболее распространенными культивируемыми грибами в мире и пользуются большой популярностью среди потребителей благодаря своим питательным

и органолептическим свойствам [1–3]. Качество шампиньонов определяется рядом факторов: цветом, текстурой, вкусом, pH, содержанием растворимых сухих веществ, влажностью, убылью массы и др. Данные факторы характеризуют хранимоспособность грибов и позволяют судить о лежкости при их хранении, транспортировке и т. п. [3–16].

Грибы являются скоропортящимся продуктом: им свойственна быстрая потеря качества сразу после сбора урожая. Это проявляется в потемнении и раскрытии шляпки, удлинении ножки, потере веса и изменении текстуры в связи с повышением интенсивности дыхания и др. [17–20]. Срок годности грибов *A. bisporus* составляет 3 суток при температуре 20–25 °C и до 8 суток в условиях охлаждения при 0–2 °C [21, 22].

В связи с этим снижение потерь от порчи и повышение микробиологической безопасности грибов является серьезной проблемой для увеличения их хранимоспособности. Одним из способов решения данной проблемы является фасовка грибов в полимерную упаковку для розничной торговли. Это обусловлено рядом преимуществ: эстетичный товарный вид, удобство выкладки и привлекательное оформление с возможностью предоставления полной информации о товаре [13, 23].

Полимерная упаковка, используемая для фасовки свежих шампиньонов, должна отвечать следующим требованиям:

– соответствовать требованиям действующих нормативных документов по санитарно-гигиеническим показателям;
– сохранять свои свойства в течение срока хранения продукции;
– быть устойчивой к воздействию низких температур и повышенной влажности, т. к. хранение продукции осуществляется в холодильных камерах;
– обладать селективной газопроницаемостью и требуемой паропроницаемостью, т. к. одним из условий сохранения продукции является создание внутри упаковки определенной газовой среды.

Для оптимизации существующих технологий и увеличения срока годности упакованной продукции применяется обработка растительного сырья физическими методами, а именно обработка ионизирующими излучениями (γ-излучение, ускоренные электроны, рентгеновское излучение), ультразвуком, ультрафиолетовым излучением и др. [2, 24–30].

Ультрафиолетовое (УФ) излучение является одним из видов электромагнитного излучения (длина волны от 100 до 400 нм). Диапазон облучения делится на типы: УФ-А (315–400 нм), УФ-В (280–315 нм), УФ-С (100–280 нм) и УФ-Ф (10–100 нм) [31]. В разных диапазонах спектра УФ-излучение имеет различную проникающую способность (максимальную в диапазоне УФ-А, наименьшую в диапазоне УФ-С). Самым сильным бактерицидным действием обладает УФ-излучение в диапазоне С при длине волны 254 нм. Глубина проникновения составляет 35–50 мкм («6–10 слоев клеток») в зависимости от вида растительной ткани [32, 33].

Сырьё обрабатывают в упакованном виде, поэтому упаковочный материал должен быть проницаемым для ультрафиолетового излучения [34].

Факторы, связанные с реакцией растительного объекта, включают дозу облучения, скорость ее набора и условия окружающей среды во время облучения (температура, относительная влажность воздуха, состав газовой среды), а также количество жизнеспособных микроорганизмов на поверхности сырья.

Согласно литературным источникам и экспериментальным данным обработка УФ-излучением приводит к снижению потерь массы растительных объектов с сохранением их физико-химических и органолептических свойств, а также способствует активации защитных механизмов растительной клетки, которые приводят:

– к накоплению веществ с антибактериальными и антиокислительными свойствами, которые задерживают начало стадии созревания растительных объектов, позволяя предотвратить потери от порчи продукции [35];
– к синтезу полезных для здоровья соединений и трансформированнию эргостерола в витамин D_2 [33, 36].

Важным моментом при обработке УФ-излучением является оптимально подобранный режим обработки: мощность дозы и время обработки в связи с проявлением термического эффекта УФ-излучения при его длительном воздействии. Отепление растительных объектов может приводить к ухудшению их органолептических свойств. Для расчета эффективной дозы УФ-излучения учитывают свойства источников излучения, их расположение относительно обрабатываемых объектов и плотность потока мощности.

В различных исследованиях описывается изменение качественных показателей шампиньонов в зависимости от обработки УФ-излучением [37–39]. Выбор исследуемых показателей является феноменологическим, т. е. основан на ранее проведенных научных исследованиях или на решении самих исследователей, поэтому такой выбор является условным. Таким образом, чтобы прийти к однозначности, необходимо выявить факторы (маркеры), являющиеся значимыми отклику грибов к физическому воздействию (ультрафиолетовому излучению). Для этого необходимо разработать унифицированный формализованный подход для их определения.

По данным литературных источников существуют работы, в которых подобраны подходы определения

химических и фито-маркеров для контроля качества растительного сырья [40–42].

Шампиньоны вида *A. bisporus* имеют отклик при обработке физическими методами, который отображается в изменении таких физиологических процессов, как интенсивность дыхания, транспирация, перевод запасающих компонентов и вовлечение их в процессы метаболизма. Это сказывается на потребительских свойствах, чувствительности к условиям хранения и продолжительности хранения. Таким образом, для установления режимов адекватной обработки необходимо контролировать отклик обрабатываемого объекта на саму обработку. Для нахождения оптимума режимов обработки необходимо выявление спектров значимых факторов (свойств), которые могут быть использованы в качестве маркеров, характеризующих деградацию растительной ткани.

Существуют разные способы определения значимых факторов. Одним из наиболее известных является метод Плакетта-Бермана, который основан на «отсеивании» незначимых факторов [43, 44]. Однако описанный метод отличается одним недостатком, поскольку основан на варьировании активных факторов внешнего воздействия, которые независимы друг от друга и их можно произвольно задавать в качестве условий эксперимента.

В данной работе стояла следующая задача: выявить лабильные факторы как свойства самого объекта. Качественные показатели грибов – факторы, связанные с самим объектом в единый комплекс, они не могут быть управляемыми (варьируемыми). Например, подбирая сырье (грибы) с определенной влажностью, нельзя задать значение других качественных показателей в значениях, необходимых для реализации метода Плакетта-Бермана. Поэтому был рассмотрен другой подход.

На основании существующей нормативной базы был принят условно действующий срок годности белых шампиньонов – 16 суток. Выбрали факторы, которые по литературным данным могут изменяться в результате целевой обработки. Провели обработку грибов различными дозами УФ-излучения в диапазонах A, B, C и заложили их на холодильное хранение вместе с необработанным контролем на 16 суток. Через 16 суток провели анализ выбранных факторов, после чего был проведен парный двухвыборочный тест с определением равенства или неравенства дисперсий в повторностях и равенства или неравенства средних при заданной вероятности ошибки [45, 46].

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали свежие плодовые тела промышленно культивируемого шампиньона двуспорового (*Agaricus bisporus*), полученные из производственного комплекса «Дон Шампиньон» (Рязанская область). После съема они были транспортированы с сохранением температурного режима.

Предварительно отобранные охлажденные плодовые тела шампиньонов помещали в пластиковые лотки, запаиваемые в пакеты из полимерной пленки BOPP. Характеристики пленки: толщина 40 мкм; газопроницаемость по кислороду – 1500 см^3/м^2/сут (справочные данные при атмосферном давлении и температуре 23 °C); паропроницаемость – 3,3 г/м^2·24 ч·бар (38 °C, относительная влажность воздуха 90 %).

Образцы обрабатывали ультрафиолетовым излучением на экспериментальной бестеневой УФ-установке технологического стенда института с двумя парами УФ-ламп (мощностью 30 Вт каждая) в диапазоне C – с плотностью потока мощности 2,7×10^3 Вт/м^2 в интервале доз от 100 до 800 Дж/м^2, в диапазоне A – с плотностью потока мощности 6,90×10^3 Вт/м^2 в интервале доз от 100 до 800 Дж/м^2, в диапазоне B – с плотностью потока мощности 0,79×10^3 Вт/м^2 в интервале доз от 40 до 200 Дж/м^2. В процессе обработки контролировали температуру внутри грибов с использованием термопарных датчиков компактного модуля E-Val Pro № 635456 (ELLAB, Дания), чтобы не допустить отепление и выпадение капельной влаги.

Упакованные и обработанные образцы помещали на хранение в холодильную камеру при температуре 4 ± 2 °C. Выемки образцов осуществляли по истечении 16 суток. Были проанализированы следующие показатели: текстура, влагосодержание, убыль массы, содержание растворимых сухих веществ, pH, светлота и цветовое отличие. Плотность потока мощности ультрафиолетового излучения во всех диапазонах контролировали комбинированным УФ-радиомером ТКА-ПКМ (ООО «Научно-техническое предприятие «ТКА», Россия). Консистенцию тканей шляпки плодовых тел в ее верхней точке вблизи вертикальной оси определяли пенетрометром цифровым плодовым FR-5120 (Тайвань). Концентрацию растворимых сухих веществ определяли по ГОСТ ISO 2173 на рефрактометре Аббе 1 ATAGO с подсветкой и дополнительной шкалой, убыль массы – гравиметрически, pH – потенциометрически по ГОСТ 26188-2016 с помощью pH-метра-иономера Эксперт-001 («Эконикс-эксперт», Россия) и комбинированного одноключевого электрода, влагосодержание – с помощью анализатора влажности Sartorius MA 35 (Германия) по ГОСТ 28561-90, цветовые характеристики – по ISO/CIE 11664-6:2014 с помощью ПО Photoshop CS5 и зеркального фотоаппарата Sony Alpha DSLR-A290.

Каждый эксперимент проводили в шестикратной повторности с отсеиванием статистически недостоверных данных.

Математическую обработку проводили с использованием оригинального программного обеспечения, прилагаемого к аналитическому оборудованию, а также специализированного программного обеспечения TableCurve 2D v.5.01 (SYSTAT Software Inc.), Wolfram Mathematica 10.4 и табличного процессора Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation) со встроенным языком программирования VBA.

Первоначально было рассмотрено изменение результатов двухвыборочного теста, где в качестве одной выборки выступал контроль при заданных условиях. Затем было отмечено уменьшение заданной вероятности ошибки (α), что способствует увеличению скорости определения неравенства средних и наоборот. В качестве интегрального анализа величины, характеризующей лабильность того или иного показателя сырья к внешнему воздействию, может выступать величина α в динамике на интервалах области определения значений, характеризующих внешнее воздействие. В качестве реперного значения принимается максимально приемлемая величина α = 0,05 и для сравнения α = 0,1. Расчет выполняли численным методом с использованием функции «поиск решений» табличного процессора Microsoft Excel. Двухвыборочный тест позволяет оперировать выборками как с одинаковыми, так и с различающимися дисперсиями. В связи с этим данный подход может быть адекватно использован даже с учетом выбросов статистических погрешностей.

Таким образом, для последовательности доз УФ-излучения были определены точечные (дискретные) значения минимально допустимых α. Затем для получения непрерывной картины мы аппроксимировали полученные значения в виде функции от дозы облучения α = f(D).

Если значение показателя α будет меньше порогового, то вероятность ошибки суждения определяет, что в данной точке для данного показателя среднее по выборкам отличается друг от друга. Следовательно, исследуемый показатель является маркерным и наоборот.

Для определения порогового значения α был рассчитан критерий приведения показателей Q:

$$Q = \frac{t_P}{t_{T(2\alpha)}} \quad (1)$$

где t_p – расчетное значение критерия t-Стьюдента; $t_{T(2\alpha)}$ – табличное значение критерия t-Стьюдента на предмет равенства средних.

Данный критерий является динамической величиной и при прочих равных условиях является функцией от α, где α – это заданная вероятность ошибки.

Для расчета критерия Q были определены средние значения показателей качества (x_0 и x_i), дисперсии по каждой паре (S_0 и S_i) и количество повторностей n_0 и n_i для каждой дозы облучения на 16 сутки хранения соответственно.

Затем было определено расчетное значение критерия Фишера (F) в зависимости от величины дисперсии:

при $S_0 > S_i$ величина данного критерия выражается следующим образом:

$$F_P = \frac{S_0}{S_i} \quad (2)$$

при $S_0 > S_i$

$$F_P = \frac{S_i}{S_0} \quad (3)$$

Степени свободы (m) определяются в зависимости от количества повторностей и от величины дисперсии:

при $S_0 > S_i$:

$$m_1 = n_0 - 1 \quad (4)$$

при $S_0 > S_i$:

$$m_1 = n_i - 1 \quad (5)$$

при $S_0 > S_i$:

$$m_2 = n_i - 1 \quad (6)$$

при $S_0 > S_i$:

$$m_2 = n_0 - 1 \quad (7)$$

Табличное значение критерия Фишера определяется с помощью встроенной функции

$$F_T = F_{(\alpha;m_1;m_2)} \quad 8)$$

если $F_P \le F_T$, то равенство дисперсий $\left(\frac{S_0}{S_i}\right)$ случайно и наоборот.

Затем проводилось определение расчетного значения критерия t-Стьюдента в зависимости от величины критерия Фишера:

при $F_P \le F_T$ его значение рассчитывается по формуле:

$$t_P = \frac{\left|\overline{x_1} - \overline{x_0}\right|}{S\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_0}}} \quad (9)$$

где S – несмещенная оценка дисперсии, выраженная следующим образом:

$$S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)\cdot S_1^2 + (n_0 - 1)\cdot S_0^2}{n_1 + n_0 - 2}} \quad (10)$$

при $F_p > F_T$ значение критерия t-Стьюдента можно рассчитать:

$$t_P = \frac{\left|\overline{x_1} - \overline{x_0}\right|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (11)$$

Табличное значение критерия t-Стьюдента на предмет равенства средних устанавливается в зависимости от величины критерия Фишера при $F_P \le F_T$:

$$t_{T(\alpha)} = \begin{cases} t(\alpha; n_1 + n_0 - 2) \\ t(\alpha; z) \end{cases} \quad (12)$$

при $F_p > F_T$:

$$t_{T(2\alpha)} = \begin{cases} t(2\alpha; n_1 + n_0 - 2) \\ t(2\alpha; z) \end{cases} \quad (13)$$

где z – коэффициент корреляции при условии $\overline{x_1} \rangle \overline{x_0}$:

$$\frac{1}{z} = \frac{c^2}{n_1 - 1} + \frac{(c-1)^2}{n_0 - 1} \quad (14)$$

где коэффициент c может быть выражен:

$$c = \frac{\frac{S_1^2}{n_1^2}}{\frac{S_1^2}{n_1^2} + \frac{S_0^2}{n_0^2}} \quad (15)$$

при $\overline{x_0} > \overline{x_1}$:

$$\frac{1}{z} = \frac{c^2}{n_0 - 1} + \frac{(c-1)^2}{n_1 - 1} \quad (16)$$

где коэффициент c выражается:

$$c = \frac{\frac{S_0^2}{n_0^2}}{\frac{S_0^2}{n_0^2} + \frac{S_1^2}{n_1^2}} \quad (17)$$

Таким образом, при расчете критерия Q в случае $t_P > t_{T(\alpha)}$ дисперсии не равны ($S_0 \ne S_i$) при заданном α (α = 0,05). Следовательно, значения средних статистически существенно не равны $\overline{x_1} \ne \overline{x_0}$ или неравенство между ними статистически значимо, а при $t_P \le t_{T(2\alpha)}$ разница между ними статистически не значима ($\overline{x_1} \approx \overline{x_0}$).

Величина α, при которой $Q = 1$ является пограничной, т. е при ее дальнейшем увеличении можно будет утверждать о статистически значимом неравенстве и о наличии статистически значимого различия сравниваемых величин.

Результаты и их обсуждение

Особенностью разработанного подхода является возможность аналитического определения диапазонов интенсивности внешнего воздействия (в данном случае доз УФ-излучения), при которых анализируемый показатель (или фактор) является значимым или незначимым. На основании этого можно аргументированно принимать решение о целесообразности анализа тех или иных факторов, характеризующих обрабатываемый объект, по которым однозначно можно судить о значимом отклике.

Применяя данный подход, мы определили диапазон доз для каждого из факторов, при которых они являются значимыми по отношению к воздействию с учетом нативной вариативности биологического материала.

Для последовательности доз УФ-излучения были определены точечные (дискретные) значения минимально допустимых вероятностей ошибок α. Для получения непрерывной картины аппроксимировали полученные значения в виде функции от дозы облучения α = f(D).

В результате обработки полученных данных определили расчетные вероятности ошибки для белых шампиньонов после 16 суток хранения относительно исходных значений для каждого показателя качества, определяемого в экспериментах при УФ-излучении в диапазонах А, В и С (табл. 1).

Показатель содержания растворимых сухих веществ незначительно изменяется в зависимости от дозы УФ-излучения для всех исследуемых диапазонов. Показатель влажности незначительно изменяется при обработке УФ-излучением только в диапазоне А. Такой разброс значений расчетных вероятностей ошибок связан с высокой дисперсностью качественных показателей биологически неоднородного объекта исследования.

Для получения непрерывной картины значения α по каждому качественному показателю были аппроксимированы в виде функции от дозы облучения α = f(D) для каждого вида излучения. Для УФ-излучения в диапазоне А, В и С динамика расчетных значений α представлена на рисунках 1–3 соответственно.

На основании полученных данных построены графики, обобщающие диапазон доз, значимо влияющих на изменение качественных показателей для каждого вида УФ-излучения при заданных вероятностях ошибок (α = 0,05 и 0,1). Графики приведены на рисунке 4.

Обработка белых шампиньонов УФ-излучением в диапазоне А приводит к значимому изменению

Таблица 1. Вероятности ошибки для белых шампиньонов после 16 суток хранения относительно исходных значений для каждого показателя качества

Table 1. Error probabilities for champignons on storage day 16 vs. initial values for each quality indicator

Показатель качества	α в экспериментах		
	УФ-А	УФ-В	УФ-С
Текстура	1,44E-10	6,3E-21	1,3556E-06
pH	1,05E-05	0,00102	5,96E-10
Влажность	0,072825	0,03661	0,01620108
Растворимые сухие вещества	0,412098	0,36382	0,0777033
Убыль массы	0,000546	0,00105	0,00015612
Цветовое отличие	9,13E-15	5,1E-14	1,5868E-15
Светлота	7,63E-10	0,00075	1,112E-18

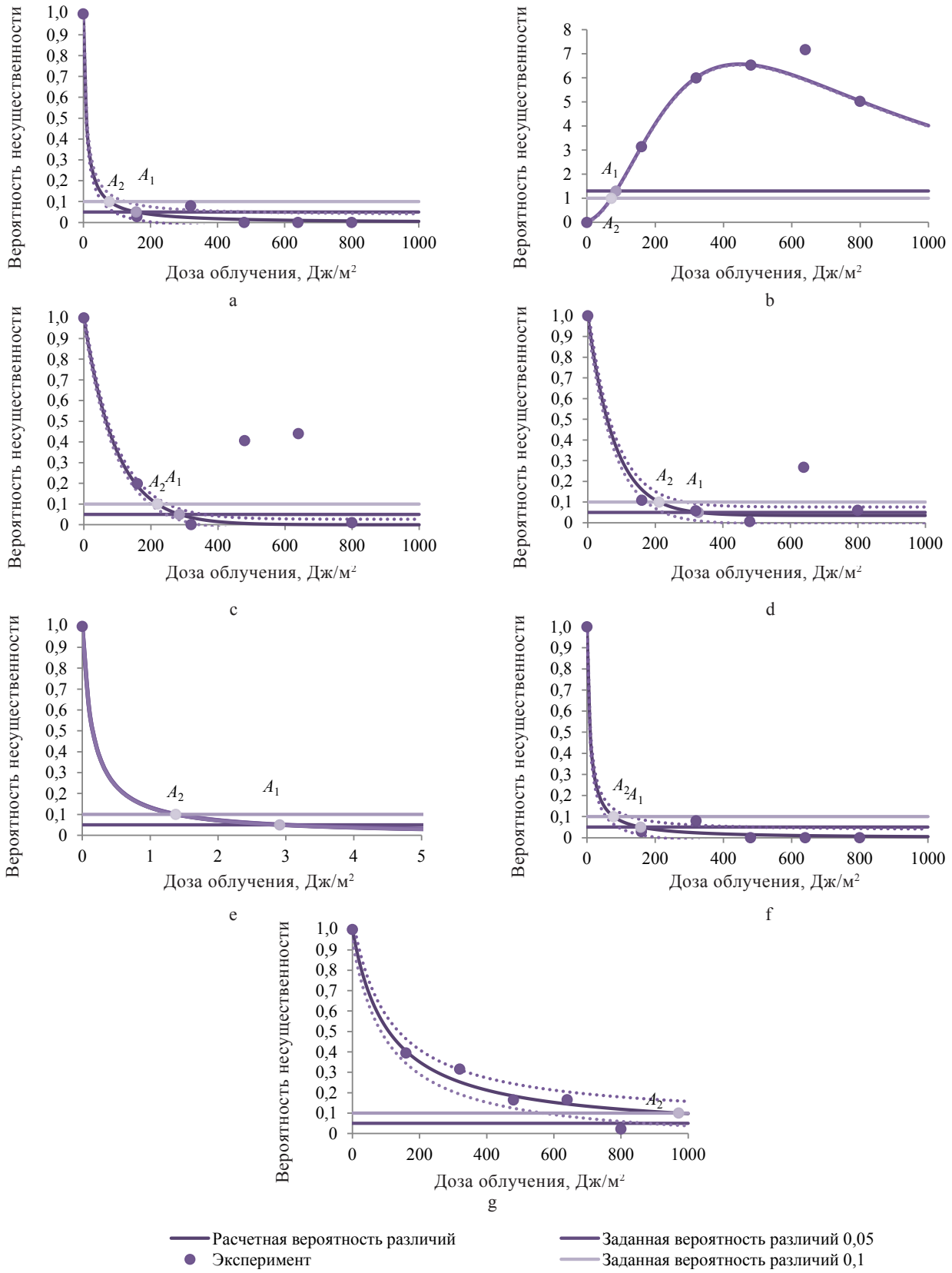

Рисунок 1. Динамика расчетных значений α при обработке белых шампиньонов УФ-излучением в диапазоне А: a – текстура; b – pH; c – влажность; d – растворимые сухие вещества; e – цветовое отличие; f – светлота; g – убыль массы

Figure 1. Calculated values α during ultraviolet treatment of champignons in range A: a – texture; b – pH; c – moisture; d – soluble solids; e – color; f – lightness; g – weight loss

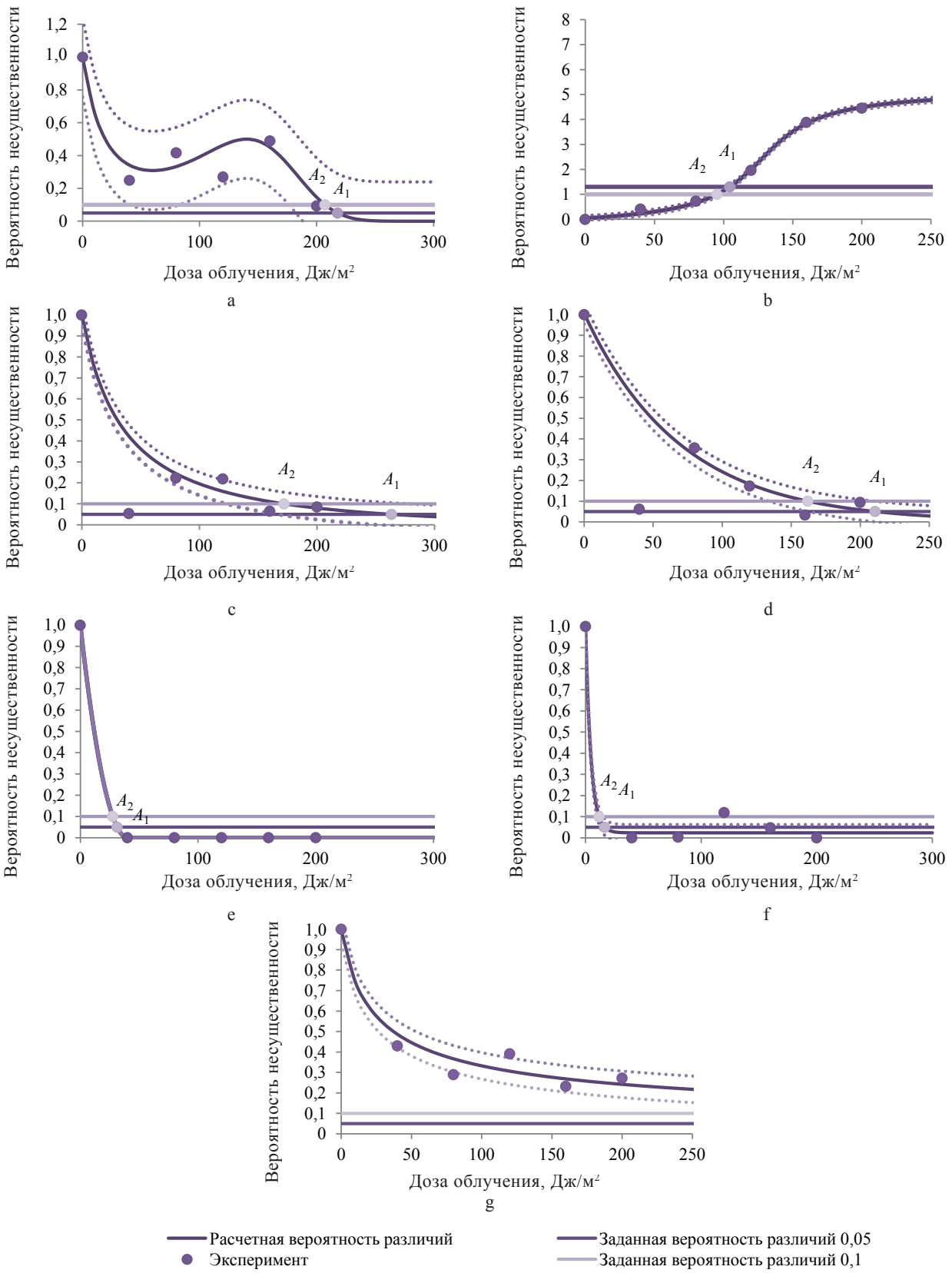

Рисунок 2. Динамика расчетных значений α при обработке белых шампиньонов УФ-излучением в диапазоне B: a – текстура; b – pH; c – влажность; d – растворимые сухие вещества; e – цветовое отличие; f – светлота; g – убыль массы

Figure 2. Calculated values α during ultraviolet treatment of champignons in range B: a – texture; b – pH; c – moisture; d – soluble solids; e – color; f – lightness; g – weight loss

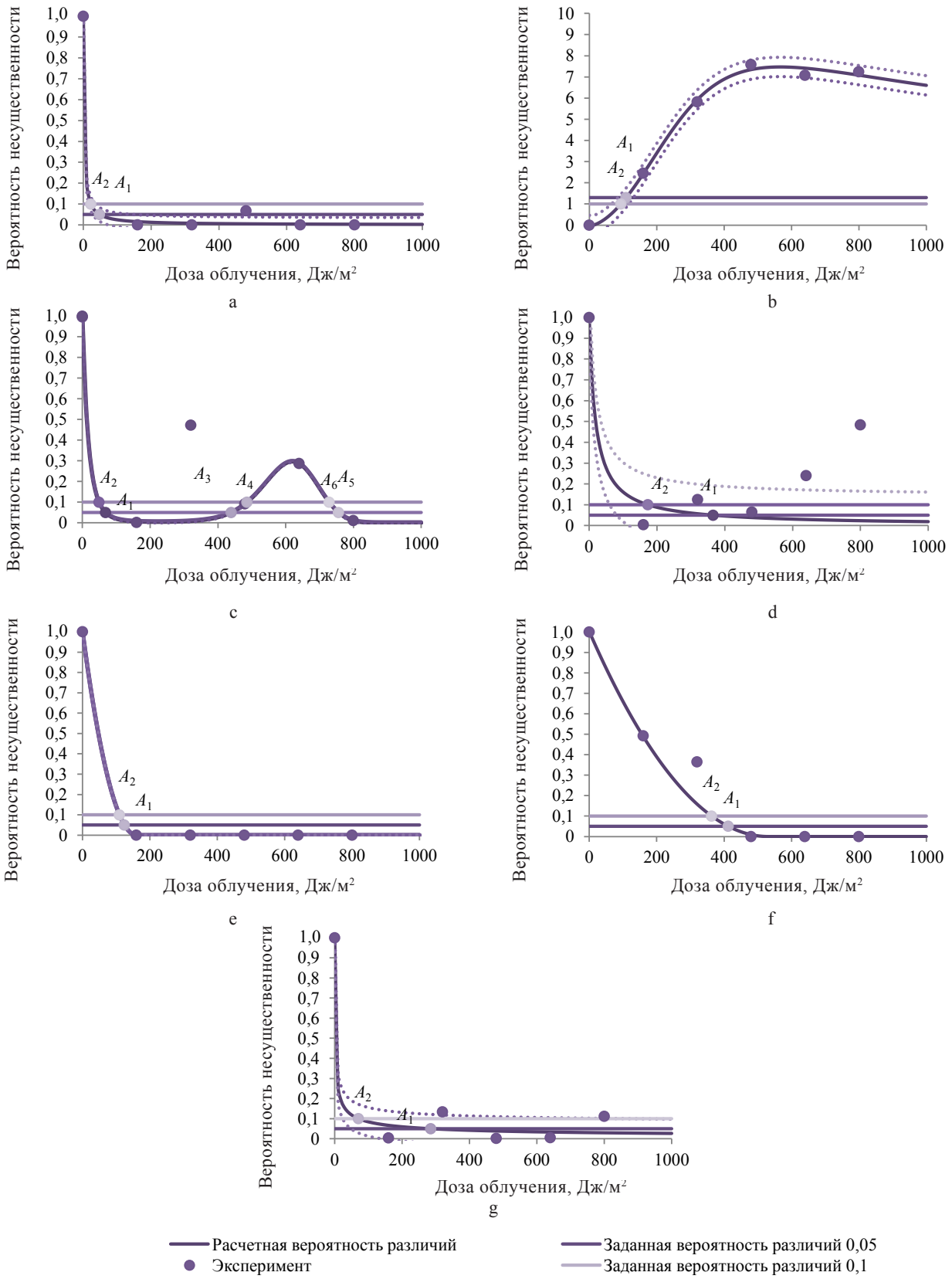

Рисунок 3. Динамика расчетных значений α при обработке белых шампиньонов УФ-излучением в диапазоне С: a – текстура; b – pH; c – влажность; d – растворимые сухие вещества; e – цветовое отличие; f – светлота; g – убыль массы

Figure 3. Calculated values α during ultraviolet treatment of champignons in range C: a – texture; b – pH; c – moisture; d – soluble solids; e – color; f – lightness; g – weight loss

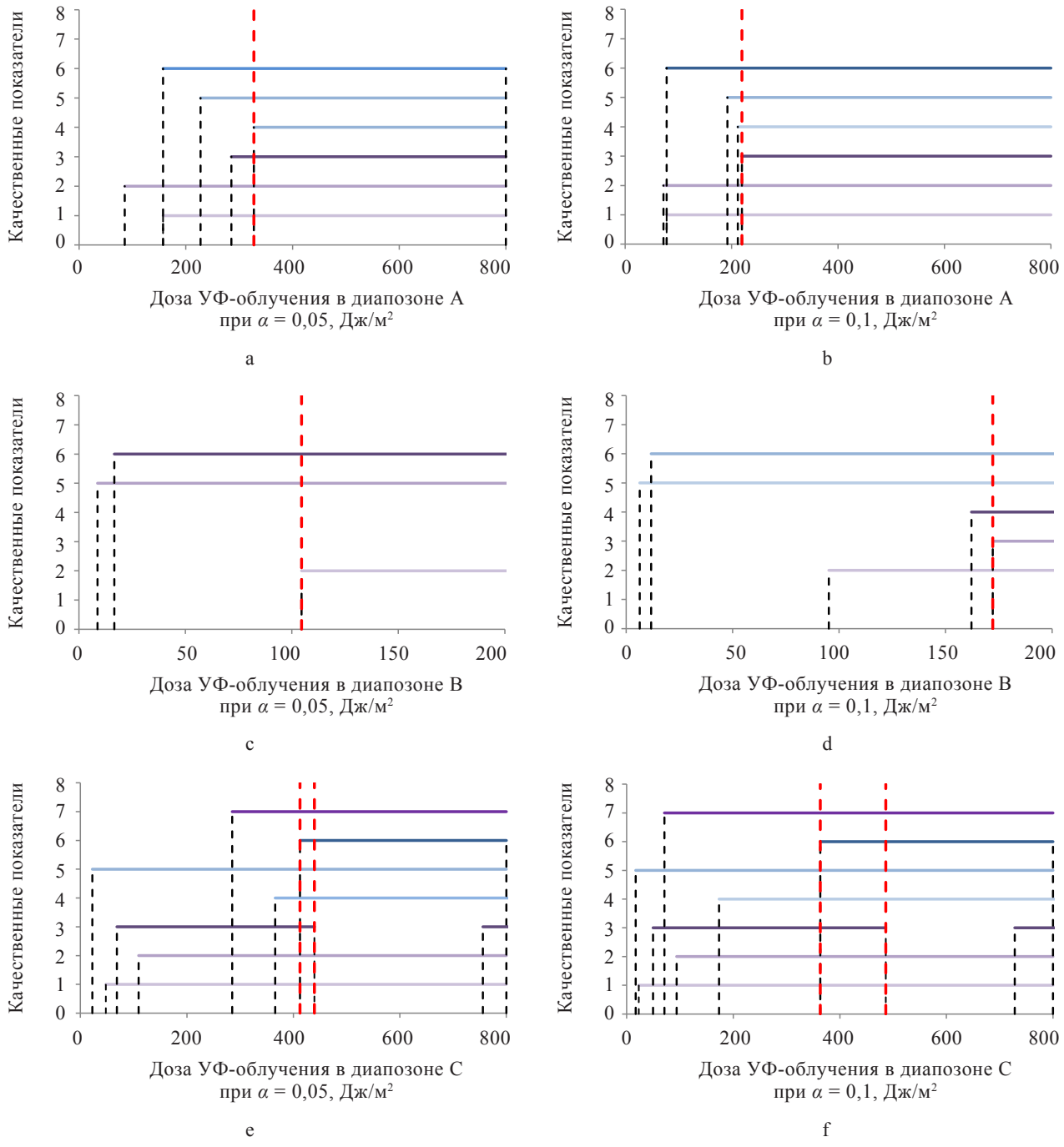

Рисунок 4. Диапазоны доз, значимо влияющих на изменение качественных показателей белых шампиньонов в результате обработки УФ-излучением при заданных значениях вероятности ошибки: a – текстура; b – pH; c – влажность; d – растворимые сухие вещества; e – цветовое отличие; f – светлота

Figure 4. Dose ranges that change the quality indicators of champignons after ultraviolet treatment at different error probability values: a – texture; b – pH; c – moisture; d – soluble solids; e – color; f – lightness

всех исследуемых показателей, кроме убыли массы, при α = 0,05 и 0,1; в диапазоне В – к значимому изменению показателей pH, цветового отличия и светлоты при α = 0,05, при α = 0,1 к таким показателям относятся все, кроме текстуры и убыли массы; в диапазоне С – к значимому изменению всех исследуемых показателей.

Определен диапазон доз, значимо влияющих на изменение исследуемых качественных показателей белых шампиньонов для каждого вида УФ-излучения (табл. 2).

Таблица 2. Диапазоны доз, значимо влияющих на изменение исследуемых качественных показателей белых шампиньонов

Table 2. Dose ranges that change the quality indicators of champignons

Вид излучения	A	Границы диапазона доз, Дж/м^2	
		от	до
УФ-A	0,05	327,8	800,0
	0,10	219,5	800,0
УФ-B	0,05	104,6	200,0
	0,10	172,2	200,0
УФ-C	0,05	412,4	439,5
		755,9	800,0
	0,10	363,3	486,2
		728,2	800,0

Обработка УФ-излучением в диапазоне B из-за малого значения плотности потока мощности ($0{,}79\times10^3$ Вт/м^2) осуществляется за более продолжительный временной промежуток. Обработка большими дозами (более длительная экспозиция) приводит к отеплению сырья более чем на 2 °C. Это приведет к нарушению температурного режима хранения. Таким образом, обработка белых шампиньонов УФ-излучением в диапазоне B является нецелесообразной.

Выводы

В результате исследования был разработан эффективный подход к определению значимо изменяющихся показателей качества растительных объектов на примере белых шампиньонов *Agaricus bisporus*.

Были определены значимо изменяющиеся показатели качества свежих белых шампиньонов, прошедших обработку УФ-излучением, после 16 суток хранения при температуре 4 °C относительно необработанного контроля.

При использовании данного подхода определен диапазон доз для каждого из исследуемых показателей качества шампиньонов, при котором целевые показатели являются маркерными по отношению к применяемому виду УФ-обработки.

Критерии авторства

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с публикацией данной статьи.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Blumfield M, Abbott K, Duve E, Cassettari T, Marshall S, Fayet-Moore F. Examining the health effects and bioactive components in *Agaricus bisporus* mushrooms: A scoping review. Journal of Nutritional Biochemistry 2020;84. https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2020.108453

2. Yan M, Yuan B, Xie Y, Cheng S, Huang H, Zhang W, *et al.* Improvement of postharvest quality, enzymes activity and polyphenoloxidase structure of postharvest *Agaricus bisporus* in response to high voltage electric field. Postharvest Biology and Technology 2020;166. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111230

3. Djekic I, Vunduk J, Tomašević I, Kozarski M, Petrovic P, Niksic M, *et al.* Application of quality function deployment on shelf-life analysis of *Agaricus bisporus* Portobello. LWT. 2017;78:82–89. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.036

4. Fedyanina NI, Karastoyanova OV, Korovkina NV. Methods for determining color characteristics of vegetable raw materials. A review. Food Systems. 2021;4(4):230–238. (In Russ.). https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-4-230-238

5. Nasiri M, Barzegar M, Sahari MA, Niakousari M. Efficiency of Tragacanth gum coating enriched with two different essential oils for deceleration of enzymatic browning and senescence of button mushroom (*Agaricus bisporus*). Food Science and Nutrition. 2019;7(4):1520–1528. https://doi.org/10.1002/fsn3.1000

6. Huang Q, Qian X, Jiang T, Zheng X. Effect of chitosan and guar gum based composite edible coating on quality of mushroom (*Lentinus edodes*) during postharvest storage. Scientia Horticulturae. 2019;253:382–389. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.062

7. Djekic I, Vunduk J, Tomašević I, Kozarski M, Petrovic P, Niksic M, *et al.* Total quality index of *Agaricus bisporus* mushrooms packed in modified atmosphere. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2016;97(9):3013–3021. https://doi.org/10.1002/jsfa.8142

8. Lin X, Sun D-W. Research advances in browning of button mushroom (*Agaricus bisporus*): Affecting factors and controlling methods. Trends in Food Science and Technology. 2019;90:63–75. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.007

9. Tarafdar A, Shahi NC, Singh A. Color assessment of freeze-dried mushrooms using Photoshop and optimization with genetic algorithm. Journal of Food Process Engineering. 2018;43(1). https://doi.org/10.1111/jfpe.12920

10. Nakilcioğlu-Taş E, Ötleş S. Kinetics of colour and texture changes of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) coated with chitosan during storage at low temperature. Anais da Academia Brasileira de Ciencias. 2020;92(2):1–15. https://doi.org/10.1590/0001-3765202020181387

11. Song Y, Hu Q, Wu Y, Pei F, Kimatu BM, Su A, *et al.* Storage time assessment and shelf-life prediction models for postharvest *Agaricus bisporus*. LWT. 2018;101:360–365. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.020

12. Khan ZU, Aisikaer G, Khan RU, Bu J, Jiang Z, Ni Z, *et al.* Effects of composite chemical pretreatment on maintaining quality in button mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage. Postharvest Biology and Technology. 2014;95:36–41. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.04.001

13. Salamat R, Ghassemzadeh HR, Ranjbar F, Jalali A, Mahajan P, Herppich WB, *et al.* The effect of additional packaging barrier, air moment and cooling rate on quality parameters of button mushroom (*Agaricus bisporus*). Food Packaging and Shelf Life. 2020;23. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100448

14. Lu Y, Zhang J, Wang X, Lin Q, Liu W, Xie X, *et al.* Effects of UV-C irradiation on the physiological and antioxidant responses of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) during storage. International Journal of Food Science Technology. 2016;51(6):1502–1508. https://doi.org/10.1111/ijfs.13100

15. Zhang K, Pu Y-Y, Sun D-W. Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (*Agaricus bisporus*): A review. Trends in Food Science Technology. 2018;78:72–82. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.012

16. Yan J, Ban Z, Luo Z, Yu L, Wu Q, Li D, *et al.* Variation in cell membrane integrity and enzyme activity of the button mushroom (*Agaricus bisporus*) during storage and transportation. Journal of Food Science and Technology. 2020;58(5):1655–1662. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04674-1

17. Diamantopoulou PA, Philippoussis AN. Cultivated mushrooms: Preservation and processing. In: Hui YH, Özgül Evranuz E, editors. Handbook of vegetable preservation and processing. CRC Press; 2015. pp. 495–525. https://doi.org/10.1201/b19252-26

18. Jiang T. Effect of alginate coating on physicochemical and sensory qualities of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) under a high oxygen modified atmosphere. Postharvest Biology and Technology. 2013;76:91–97. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.09.005

19. Xu Y, Tian Y, Ma R, Liu Q, Zhang J. Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. Food Chemistry. 2016;197:436–444. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.144

20. Saniewski M, Falandysz J, Zalewska T. ^{137}Cs and ^{40}K activity concentrations in edible wild mushrooms from China regions during the 2014–2016 period. Foods and Raw Materials. 2022;10(1):86–96. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-1-86-96

21. Ding Y, Zhu Z, Zhao J, Nie Y, Zhang Y, Sheng J, *et al.* Effects of postharvest brassinolide treatment on the metabolism of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) in relation to development of browning during storage. Food and Bioprocess Technology. 2016;9(8):1327–1334. https://doi.org/10.1007/s11947-016-1722-1

22. Gao M, Feng L, Jiang T. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment. Food Chemistry. 2014;149:107–113. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.073

23. Taghizadeh M, Gowen A, Ward P, O'Donnell CP. Use of hyperspectral imaging for evaluation of the shelf-life of fresh white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) stored in different packaging films. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2010;11(3):423–431. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.01.016

24. Fernandes A, Barreira JCM, Günaydi T, Alkan H, Antonio AL, Oliveira MBPP, *et al.* Effect of gamma irradiation and extended storage on selected chemical constituents and antioxidant activities of sliced mushroom. Food Control. 2017;72:328–337. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.04.044

25. Joshi B, Moreira RG, Omac B, Castell-Perez ME. A process to decontaminate sliced fresh cucumber (*Cucumis sativus*) using electron beam irradiation. LWT. 2018;91:95–101. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.034

26. Alonso M, Palou L, Ángel del Río M, Jacas J-A. Effect of X-ray irradiation on fruit quality of clementine mandarin cv. "*Clemenules*". Radiation Physics and Chemistry. 2007;76(10):1631–1635. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2006.11.015

27. Dellarosa N, Frontuto D, Laghi L, Dalla Rosa M, Lyng JG. The impact of pulsed electric fields and ultrasound on water distribution and loss in mushrooms stalks. Food Chemistry. 2017;236:94–100. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.105

28. Bredihin SA, Andreev VN, Martekha AN, Schenzle MG, Korotkiy IA. Erosion potential of ultrasonic food processing. Foods and Raw Materials. 2021;9(2):335–344. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-335-344

29. Lagnika C, Zhang M, Nsor-Atindana J, Bashari M. Effects of ultrasound and chemical treatments on white mushroom (*Agaricus bisporus*) prior to modified atmosphere packaging in extending shelf-life. Journal of Food Science and Technology. 2012;51(12):3749–3757. https://doi.org/10.1007/s13197-012-0904-8

30. Xiao K, Liu Q, Wang L, Zhang B, Zhang W, Yang W, *et al.* Prediction of soluble solid content of *Agaricus bisporus* during ultrasound-assisted osmotic dehydration based on hyperspectral imaging. LWT. 2020;122. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109030

31. Riazantseva KA, Sherstneva NE. Traditional and Innovative uses of ultraviolet treatment in the dairy industry. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(2):390–406. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372

32. Lei J, Li B, Zhang N, Yan R, Guan W, Brennan CS, *et al.* Effects of UV-C treatment on browning and the expression of polyphenol oxidase (PPO) genes in different tissues of *Agaricus bisporus* during cold storage. Postharvest Biology and Technology. 2018;139:99–105. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.11.022

33. Kalaras MD, Beelman RB, Elias RJ. Effects of postharvest pulsed UV light treatment of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) on vitamin D_2 content and quality attributes. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2011;60(1):220–225. https://doi.org/10.1021/jf203825e

34. Shishkina NS, Karastoyanova OV, Korovkina NV, Fedyanina NI. Complex technology for storing plant products using UV radiation. Vsyo o Myase. 2020;(5S):407–411. (In Russ.). https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-407-411

35. Wu X, Guan W, Yan R, Lei J, Xu L, Wang Z. Effects of UV-C on antioxidant activity, total phenolics and main phenolic compounds of the melanin biosynthesis pathway in different tissues of button mushroom. Postharvest Biology and Technology. 2016;118:51–58. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.03.017

36. Ko JA, Lee BH, Lee JS, Park HJ. Effect of UV-B exposure on the concentration of vitamin D_2 in sliced shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) and white button mushroom (*Agaricus bisporus*). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008;56(10):3671–3674. https://doi.org/10.1021/jf073398s

37. Kondratenko VV, Fedyanina NI, Karastoyanova OV. Change of the fresh mushroom texture in the process of refrigerated storage after processing with UV radiation. Izvestiya Vuzov. Food Technology. 2020;377–378(5–6):89–93. (In Russ.). https://doi.org/10.26297/0579-3009.2020.5-6.21

38. Fedyanina NI, Karastoyanova OV, Korovkina NV. Study of the dynamics of the qualitative indicator of champignons during storage after treatment with UV radiation in the a range. Food Industry. 2021;(9):56–57. (In Russ.). https://doi.org/10.52653/PPI.2021.9.9.024

39. Guan W, Fan X, Yan R. Effects of UV-C treatment on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, microbial loads, and quality of button mushrooms. Postharvest Biology and Technology. 2012;64(1):119–125. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.017

40. Liu C, Cheng Y, Guo D, Zhang T, Li Y, Hou W, *et al.* A new concept on quality marker for quality assessment and process control of Chinese medicines. Chinese Herbal Medicines. 2017;9(1):3–13. https://doi.org/10.1016/s1674-6384(17)60070-4

41. Rivera-Mondragón A, Ortíz OO, Bijttebier S, Vlietinck A, Apers S, Pieters L, *et al.* Selection of chemical markers for the quality control of medicinal plants of the genus *Cecropia*. Pharmaceutical Biology. 2017;55(1):1500–1512. https://doi.org/10.1080/13880209.2017.1307421

42. Zhang X, Zhang S, Gao B, Qian Z, Liu J, Wu S, *et al.* Identification and quantitative analysis of phenolic glycosides with antioxidant activity in methanolic extract of *Dendrobium catenatum* flowers and selection of quality control herb-markers. Food Research International. 2019;123:732–745. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.05.040

43. Ma L, Chen H, Liu F, Qi J, Pei J, Qian H. Application of Plackett-Burman design in screening casein and prebiotics for the production of ace inhibitory peptides from cow milk fermented by *L. bulgaricus LB6*. Food Technology. 2019;XXIII(2):93–100.

44. Valmorida JS, Castillo-Israel KAT. Application of Plackett-Burman experimental design in the development of muffin using adlay flour. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018;102(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/102/1/012081

45. Bartolucci AA, Singh KP, Bae S. Robustness and ruggedness. In: Bartolucci AA, Singh KP, Bae S, editors. Introduction to statistical analysis of laboratory data. John Wiley & Sons; 2015. pp. 213–234. https://doi.org/10.1002/9781118736890.ch8

46. Fetisov EA, Semipyatnyy VK, Petrov AN, Galstyan AG. Planning and analysis of the results of technological experiments. Moscow: Stalingrad; 2015. 98 p. (In Russ.).