

Научная статья

УДК 664.951.2

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-1-11-20

## Оптимизация параметров обработки икры сельди тихоокеанской озонированными растворами и оценка качества продукта при хранении

А.С. Москвичев, И.А. Тимошенкова, Е.В. Москвичева\*, Н.В. Левин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, \*moskvicheva\_ev@spbstu.ru*

**Аннотация.** Определяли оптимальные режимы двухэтапной обработки слабосоленой пробойной икры сельди тихоокеанской водными растворами озона, обеспечивающими безопасность и высокие потребительские свойства готового продукта. Объектами исследования стали замороженные ястыки сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*) и полученная из них пробойная икра. В качестве независимых переменных выбраны: концентрация озона при посоле ястыков (0–10 мг/л), концентрация озона при промывке икры-зерна (0–10 мг/л) и продолжительность посола (6–18 ч). Эксперимент реализован по плану Бокса–Бенкена для трех факторов (17 опытов). Определяли массовую долю влаги ( $Y_1$ ), перекисное число ( $Y_2$ ), общую бактериальную обсемененность ( $Y_3$ ), текстурные характеристики: твердость ( $Y_4$ ), липкость ( $Y_5$ ), жевательность ( $Y_6$ ), рассычатость ( $Y_7$ ), упругость ( $Y_8$ ); цветовые координаты CIE Lab: светлоту ( $Y_9$ ), интенсивность красного тона ( $Y_{10}$ ), интенсивность желтого тона ( $Y_{11}$ ); и обобщенный органолептический показатель ( $Y_{12}$ ). Построены адекватные квадратичные модели ( $R^2 > 0,90$ ). Установлено, что наибольшее влияние на большинство откликов оказывает концентрация озона при посоле. Многокритериальная оптимизация методом желательности позволила определить оптимальные условия: концентрация озона при посоле 6,5 мг/л, при промывке 3,0 мг/л, продолжительность посола 10,5 ч. При данных параметрах продукт характеризуется низкой микробной обсемененностью ( $Y_3 = 3,5 \cdot 10^3$  КОЕ/г), минимальным окислением липидов ( $Y_2 = 2,0$  ммоль/кг), высокой органолептической оценкой ( $Y_{12} = 86$  баллов из 100) и стабильными текстурными свойствами. Результаты исследования динамики санитарно-показательной микрофлоры и показателей качества гарантируют срок годности продукции до 30 суток при температуре хранения  $2 \pm 2^\circ\text{C}$  с учетом коэффициента резерва 1,3.

**Ключевые слова:** консервирование рыбы; водные растворы озона; оптимизация параметров; план Бокса–Бенкена; показатели качества; икра сельди

Original article

## Optimization of processing parameters for pacific herring caviar with ozonated solutions and evaluation of product quality during storage

Aleksandr S. Moskvichev, Irina A. Timoshenkova, Elena V. Moskvicheva\*, Nikita V. Levin

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,  
St.Petersburg, Russia, \*moskvicheva\_ev@spbstu.ru*

**Abstract.** The aim of the work was to determine the optimal modes of two-stage treatment of light-salted screened caviar of Pacific herring with aqueous solutions of ozone, ensuring safety and high consumer properties of the finished product. The objects of the study were frozen herring sacs (*Clupea pallasii*) and screened caviar obtained from them. The independent variables were: ozone concentration during roe sac brining (0–10 mg/L), ozone concentration during screened caviar washing (0–10 mg/L), and brining duration (6–18 h). The experiment was designed using a Box–Behnken plan for three factors (17 runs). The following parameters were measured: moisture content ( $Y_1$ ), peroxide value ( $Y_2$ ), total bacterial count ( $Y_3$ ), texture characteristics: hardness ( $Y_4$ ), adhesiveness ( $Y_5$ ), chewiness ( $Y_6$ ), cohesiveness ( $Y_7$ ), springiness ( $Y_8$ ); CIE Lab color coordinates: lightness ( $Y_9$ ), redness ( $Y_{10}$ ), yellowness ( $Y_{11}$ ); and a generalized sensory score ( $Y_{12}$ ). Adequate quadratic models were obtained ( $R^2 > 0.90$ ). Ozone concentration during brining was found to be the most influential factor for most responses. Multi-objective optimization using the desirability function determined the optimal conditions: ozone concentration during brining 6.5 mg/L, during washing 3.0 mg/L, brining duration 10.5 h. Under these conditions, the product is characterized by low bacterial contamination ( $Y_3 = 3.5 \cdot 10^3$  CFU/g), minimal lipid oxidation ( $Y_2 = 2.0$  mmol/kg), high sensory score ( $Y_{12} = 86$  out of 100), and stable texture properties. The results of the study of the dynamics of sanitary-indicative microflora and quality parameters guarantee a shelf life of up to 30 days at a storage temperature of  $2 \pm 2^\circ\text{C}$ , taking into account the reserve factor of 1.3.

**Keywords:** fish preservation; aqueous ozone solutions; parameter optimization; Box–Behnken plan; quality indicators; herring caviar

## Введение

Рост населения планеты и изменение структуры питания обуславливают повышенный спрос на доступные и полноценные источники белка. Икра рыб, в частности сельди тихоокеанской (*Clupea pallasii*), содержит до 22–24% легкоусвояемых белков, значительное количество полиненасыщенных жирных кислот, витаминов и минеральных веществ [1–3]. Однако высокая пищевая ценность икорного сырья сочетается с его уязвимостью к микробиологической порче. Контаминация происходит уже на этапе извлечения ястыков, а традиционные методы консервирования (посол, применение сорбата калия и бензоата натрия) не всегда обеспечивают достаточный барьерный эффект и могут ухудшать органолептические свойства [4].

Озон, обладающий высоким окислительно-восстановительным потенциалом (2,08 эВ), является одним из самых эффективных разрешенных пищевых антисептиков. Механизм его действия основан на повреждении клеточных стенок микроорганизмов за счет окисления ненасыщенных жирных кислот мембран, а также на модификации нуклеиновых кислот и ферментов, что приводит к гибели бактерий, вирусов и плесневых грибов [5, 6]. Озон быстро разлагается до кислорода, не оставляя токсичных остатков, что делает его экологически безопасным агентом для применения в обработке рыбы и морепродуктов [7, 8]. Однако его использование в технологии икры требует осторожности из-за возможной денатурации белков и окисления липидов, поэтому необходим поиск оптимальных режимов, которые обеспечат микробиологическую безопасность без ухудшения потребительских свойств.

Для многокритериальной оптимизации процессов в пищевых технологиях широко используется методология поверхности отклика, позволяющая при минимальном числе экспериментов оценить влияние нескольких переменных и их взаимодействие [9]. В частности, план Бокса–Бенкена часто применяют для оптимизации экстракции белков из растительного сырья [10, 11], но его использование для обоснования параметров обработки икорных продуктов озонированными растворами ранее не описано. Физико-химические изменения, происходящие под действием озона, требуют глубокого понимания механизмов взаимодействия озона с компонентами икры: белками, липидами, пигментами. Окисление сульфгидрильных групп цистеина и метионина может приводить к образованию дисульфидных связей, что изменяет структуру белков и, как следствие, текстурные свойства продукта [12]. В то же время озон способен инактивировать липоксигеназу – фермент, инициирующий цепное окисление полиненасыщенных жирных кислот, что замедляет прогоркание [13].

Цель работы – с помощью методологии поверхности отклика определить оптимальные значения концентрации озона в водно-солевых растворах и времени выдержки при посоле икры сельди, обеспечивающие наилучшее сочетание физико-химических, микробиологических, текстурных и органолептических показателей готового продукта, а также исследовать динамику этих показателей при хранении.

## Объекты и методы исследования

Объектами исследования выбраны замороженные ястыки сельди тихоокеанской (ООО «РРПК ВОСТОК», Россия). Химический состав исходного сырья: влага – 70,5%, белок – 22,4%, жир – 4,8%, минеральные вещества – 2,3%. Вспомогательные материалы: вода питьевая, соль поваренная пищевая «Экстра». Озонированную воду получали на станции СОВ-Мо6Ц/о. Концентрацию озона контролировали йодометрическим титрованием [14]. К точному количеству растворов озона добавляли 1 мл 10 г/л раствора крахмала и 1 мл 100 г/л раствора йодида калия. Затем образцы ( $n = 3$ ) титровали предварительно стандартизированным 0,002 моль/л раствором йодата калия до тех пор, пока смесь не становилась темно-синей, а цвет сохранялся более 60 секунд.

**Подготовка образцов.** Замороженные ястыки размораживали при температуре 15°C до достижения среднеобъемной температуры  $0 \pm 2^\circ\text{C}$ , промывали холодной водой и направляли на посол. Посол проводили в 25%-м растворе NaCl с добавлением озона в заданных концентрациях (0; 5; 10 мг/л) при соотношении раствор : ястыки = 1 : 1 в течение 6, 12 или 18 ч (до массовой доли соли в икре 3%), затем ястыки пробивали на машине НЗ-ИФВ (Россия), отделяя икру-зерно от соединительной ткани. Полученную пробойную икру промывали в 3%-м растворе NaCl с концентрацией озона 0; 5 или

10 мг/л в течение 5 мин, после чего центрифугировали для удаления избыточной влаги и герметично упаковывали в пакеты массой нетто 1 кг. Образцы хранили при температуре  $2 \pm 2^\circ\text{C}$  до 39 суток.

**План эксперимента.** Для изучения влияния трех независимых факторов на качественные характеристики икры использовали центральный композиционный план Бокса–Бенкена. Факторы и уровни их варьирования представлены в таблице 1. Матрица плана включала 17 опытов – 12 неповторяющихся комбинаций и 5 повторений в центре плана. Каждый опыт выполняли в трехкратной повторности.

Таблица 1. Уровни варьирования независимых факторов

Table 1. Levels of independent variables

Фактор	Обозначение	Нижний уровень (-1)	Центральный уровень (0)	Верхний уровень (+1)
концентрация озона в водно-солевых растворах при посоле ястыков (мг/л)	$X_1$	0	5	10
концентрация озона в водно-солевых растворах при промывке икры (мг/л)	$X_2$	0	5	10
продолжительность посола ястыков (ч)	$X_3$	6	12	18

**Методы анализа.** Массовую долю влаги ( $Y_1$ ) определяли высушиванием навески до постоянной массы при  $105^\circ\text{C}$  (АОАС). Содержание жира оценивали экстракцией петролейным эфиром в аппарате Сокслета [15]. Общую бактериальную обсемененность ( $Y_3$ ) определяли по ГОСТ ISO 7218; результаты выражали в КОЕ/г. Перекисное число ( $Y_2$ ) измеряли титриметрическим методом [16]. Сначала жир экстрагировался из икры методом Сокслета, потом 5 г экстрагированного масла смешивался с 30 мл уксусной кислоты и хлороформа в соотношении 3:2. Затем к образцу добавлялся 5 мл насыщенного раствора йодида калия, и смесь оставлялась в темноте на 1 мин. После этого в качестве индикатора добавлялся раствор крахмала и титровался раствором тиосульфата натрия (0,01N). ПЧ рассчитывали по уравнению

$$\text{ПЧ} = \frac{V \cdot N}{m},$$

где  $V$  – объем тиосульфата натрия, пошедшего на титрование, мл;

$N$  – нормальность раствора тиосульфата натрия;

$m$  – масса образца продукта, г.

Цветовые характеристики ( $Y_9 - L^*$ ,  $Y_{10} - a^*$ ,  $Y_{11} - b^*$ ) измеряли на спектрофотометре Konica Minolta CR-410 (Япония) после калибровки по белому эталону [17].

Текстурный профильный анализ проводили на структурометре СТ-2 (Россия) с использованием цилиндрического зонда диаметром 75 мм. Выбор насыпи икринок, а не отдельной икринки, обусловлен необходимостью получения усредненной характеристики, отражающей потребительские свойства продукта, и соответствует общепринятой методологии для гранулированных пищевых продуктов, включая икорную продукцию [18]. Образец массой  $30 \pm 1$  г помещали в цилиндрическую кювету диаметром 76 мм, поверхность выравнивали и подвергали двукратному сжатию до 50% от исходной высоты при скорости перемещения траверсы 50 мм/мин. По полученным кривым «сила – время» рассчитывали следующие параметры: твердость ( $Y_4$ , Н), липкость ( $Y_5$ , Н·с), жевательность ( $Y_6$ , Н), рассыпчатость ( $Y_7$ ), упругость ( $Y_8$ ).

Органолептическую оценку проводили по разработанной 5-балльной шкале (внешний вид, консистенция, вкус, цвет, запах) с участием обученной дегустационной комиссии (не менее 5 человек). Обобщенный органолептический показатель ( $Y_{12}$ , ООПК) рассчитывали как сумму произведений балльных оценок на коэффициенты весомости, установленные методом экспертных оценок: внешний вид – 4, консистенция – 4, вкус – 6, цвет – 3, запах – 3. Максимальное значение ООПК – 100 баллов.

**Статистический анализ и оптимизация.** Для построения регрессионных моделей и оптимизации использовали пакет программ Statgraphics XVI.II. Адекватность моделей оценивали по коэффициенту детерминации ( $R^2$ ) и критерию Фишера при уровне значимости  $p < 0,05$ . Множественную оптимизацию проводили методом желательности (*desirability function*) с заданными целевыми критериями, обоснованными предварительными исследованиями и литературными данными.

## Результаты и их обсуждение

**Экспериментальные данные и описательная статистика.** В таблице 2 представлены средние значения (трехкратная повторность) всех 12 исследуемых показателей качества слабосоленой пробойной икры сельди, полученные в соответствии с планом Бокса–Бенкена для трех факторов. Диапазон варьирования концентрации озона при посоле ( $X_1$ ) составил 0–10 мг/л, концентрации озона при промывке ( $X_2$ ) – 0–10 мг/л, продолжительности посола ( $X_3$ ) – 6–18 ч. Всего реализовано 17 экспериментальных точек, включая пять повторений в центре плана (5 мг/л, 5 мг/л, 12 ч).

Таблица 2. Матрица плана и значения откликов при обработке икры сельди озонированными растворами  
Table 2. Design matrix and response values for herring caviar treatment with ozonated solutions

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$	$Y_9$	$Y_{10}$	$Y_{11}$	$Y_{12}$
1	0	0	12	68,4	4,2	530	6,7	0,8	0,9	0,21	0,20	55,8	2,1	8,7	20
2	10	0	12	60,0	2,5	16	15,2	2,9	6,5	0,45	0,62	35,5	6,2	18,3	75
3	0	10	12	58,0	3,5	40	10,5	2,1	4,2	0,38	0,55	42,1	5,1	15,4	70
4	10	5	6	61,5	2,3	8,5	16,8	3,1	7,2	0,50	0,65	33,8	6,8	19,1	79
5	5	10	6	59,8	3,2	12	14,8	2,7	5,9	0,48	0,60	40,2	5,9	17,3	80
6	5	5	12	60,0	2,1	4,4	14,5	2,8	6,2	0,48	0,63	36,2	6,0	16,5	85
7	5	0	18	57,5	3,0	5,5	17,5	3,4	7,5	0,55	0,68	38,5	6,5	18,9	72
8	5	5	12	59,8	2,2	4,5	14,2	2,7	6,0	0,47	0,62	36,5	6,1	16,3	83
9	5	5	12	60,2	2,0	4,2	14,8	2,9	6,3	0,49	0,64	36,0	5,9	16,8	84
10	5	5	12	59,9	2,1	4,6	14,6	2,8	6,1	0,48	0,63	36,3	6,0	16,4	86
11	0	5	6	69,2	4,0	450	7,2	0,9	1,1	0,23	0,22	52,3	2,5	9,2	25
12	10	5	18	56,0	2,8	2,0	19,2	3,9	8,8	0,62	0,74	32,0	8,5	20,8	50
13	5	10	18	55,2	3,4	1,5	19,8	3,8	8,2	0,60	0,72	34,8	7,8	20,2	43
14	0	5	18	61,2	3,8	85	9,8	1,8	3,5	0,33	0,48	45,6	4,2	13,5	65
15	10	10	12	54,0	2,5	1,0	20,5	4,2	9,3	0,66	0,79	31,2	8,9	21,5	40
16	5	0	6	64,2	2,9	62	11,5	2,2	4,8	0,40	0,52	44,5	4,8	14,2	68
17	5	5	12	60,1	2,1	4,3	14,7	2,8	6,2	0,48	0,63	36,4	6,0	16,6	87

$Y_1$  – влажность, %;  $Y_2$  – перекисное число, ммоль/кг;  $Y_3$  – КМАФАнМ,  $10^3$  КОЕ/г;  $Y_4$  – твердость, Н;  $Y_5$  – липкость, Н·с;  $Y_6$  – жевательность, Н;  $Y_7$  – рассыпчатость;  $Y_8$  – упругость;  $Y_9$  – светлота  $L^*$ ;  $Y_{10}$  – краснота  $a$ ;  $Y_{11}$  – желтизна  $b$ ;  $Y_{12}$  – обобщенный органолептический показатель, баллы

**Регрессионный анализ и адекватность моделей.** Для каждого из 12 откликов методом наименьших квадратов построены квадратичные модели второго порядка в кодированных переменных. Значимость коэффициентов оценивали по  $t$ -критерию при уровне  $\alpha = 0,05$ , адекватность моделей – по  $F$ -критерию и коэффициентам детерминации. Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для всех откликов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значимость эффектов в полиномиальных регрессионных уравнениях ( $p$ -значения)  
Table 3. Significance of effects in polynomial regression equations ( $p$ -values)

Отклик	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	Модель (p)	$R^2$ , %	$R^2_{adj}$ , %
$Y_1$	0,0003	0,0005	0,0003	0,0613	0,0769	0,4466	0,1437	0,3807	0,4577	0,0025	95,20	89,03
$Y_2$	0,0000	1,0000	0,3117	0,0004	0,0013	0,0008	0,1151	0,1151	0,8046	0,0000	96,81	92,70
$Y_3$	0,0012	0,0300	0,0708	0,0083	0,7227	0,9407	0,0138	0,0434	0,7613	0,0018	90,88	79,15
$Y_4$	0,0000	0,0009	0,0006	0,0035	0,1972	0,1826	0,4543	0,9188	0,6137	0,0000	97,60	94,51
$Y_5$	0,0000	0,0016	0,0007	0,0073	0,2530	0,5532	1,0000	0,8454	0,8454	0,0000	96,93	92,99
$Y_6$	0,0000	0,0024	0,0012	0,0048	0,4103	0,5546	0,6911	0,5287	0,7500	0,0001	97,10	93,38
$Y_7$	0,0000	0,0013	0,0016	0,0041	0,3712	0,5295	0,5845	0,7828	0,6802	0,0002	96,45	91,88
$Y_8$	0,0001	0,0044	0,0047	0,0076	0,7522	0,7522	0,1437	0,1640	0,7253	0,0010	94,86	88,25
$Y_9$	0,0000	0,0003	0,0015	0,0025	0,0400	0,0648	0,0123	0,1245	0,8369	0,0000	98,15	95,78
$Y_{10}$	0,0000	0,0004	0,0010	0,0329	0,4872	0,7047	0,7512	1,0000	0,8322	0,0001	97,18	93,56
$Y_{11}$	0,0000	0,0004	0,0006	0,0141	0,1059	0,3388	0,0661	0,1501	0,3002	0,0001	97,77	94,91
$Y_{12}$	0,0206	0,9285	0,3403	0,0005	0,0181	0,0711	0,0008	0,0027	0,0308	0,0012	94,66	87,79

Все модели статистически значимы ( $p$ -значение модели  $< 0,05$ ), коэффициенты детерминации  $R^2$  превышают 90%, а скорректированные  $R^2$  – 79%, что свидетельствует о хорошей прогностической способности (таблица 4). Статистика Дарбина–Уотсона близка к двум, что указывает на отсутствие автокорреляции остатков.

Таблица 4. Характеристики адекватности регрессионных моделей  
Table 4. Adequacy characteristics of regression models

Отклик	R <sup>2</sup> , %	R <sup>2</sup> adj, %	F-критерий	p(F)	Стандартная ошибка
Y <sub>1</sub>	95,20	89,03	15,40	0,0025	1,340
Y <sub>2</sub>	96,81	92,70	26,50	0,0000	0,190
Y <sub>3</sub>	90,88	79,15	8,70	0,0018	72,800
Y <sub>4</sub>	97,60	94,51	28,20	0,0000	0,950
Y <sub>5</sub>	96,93	92,99	21,30	0,0000	0,250
Y <sub>6</sub>	97,10	93,38	22,90	0,0001	0,600
Y <sub>7</sub>	96,45	91,88	18,60	0,0002	0,035
Y <sub>8</sub>	94,86	88,25	14,10	0,0010	0,055
Y <sub>9</sub>	98,15	95,78	34,90	0,0000	1,400
Y <sub>10</sub>	97,18	93,56	23,40	0,0001	0,450
Y <sub>11</sub>	97,77	94,91	29,30	0,0001	0,800
Y <sub>12</sub>	94,66	87,79	12,10	0,0012	7,600

Полные квадратичные уравнения регрессии в натуральных переменных для всех откликов приведены в таблице 5. Эти модели позволяют с высокой точностью прогнозировать значения показателей при любых комбинациях факторов в исследованном диапазоне.

Таблица 5. Полные уравнения регрессии в натуральных переменных  
Table 5. Complete regression equations in natural variables

Отклик	Уравнение
Y <sub>1</sub>	$Y_1 = 77,85 - 1,6825 \cdot X_1 - 0,4675 \cdot X_2 - 1,05833 \cdot X_3 + 0,058 \cdot X_1^2 + 0,044 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,02083 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,054 \cdot X_2^2 + 0,0175 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,01458 \cdot X_3^2$
Y <sub>2</sub>	$Y_2 = 6,425 - 0,475 \cdot X_1 - 0,24 \cdot X_2 - 0,3792 \cdot X_3 + 0,0235 \cdot X_1^2 + 0,007 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,00583 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0195 \cdot X_2^2 + 0,000833 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,01493 \cdot X_3^2$
Y <sub>3</sub>	$Y_3 = 792,9 - 138,23 \cdot X_1 - 47,57 \cdot X_2 - 27,81 \cdot X_3 + 5,1695 \cdot X_1^2 + 4,75 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,9875 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,5245 \cdot X_2^2 + 0,3833 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,07604 \cdot X_3^2$
Y <sub>4</sub>	$Y_4 = 5,205 + 1,6795 \cdot X_1 + 0,1295 \cdot X_2 - 0,07167 \cdot X_3 - 0,0797 \cdot X_1^2 + 0,015 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,001667 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0263 \cdot X_2^2 - 0,008333 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,01896 \cdot X_3^2$
Y <sub>5</sub>	$Y_5 = 0,2 + 0,4025 \cdot X_1 + 0,0375 \cdot X_2 + 0,04167 \cdot X_3 - 0,018 \cdot X_1^2 + 0,0 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,000833 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,006 \cdot X_2^2 - 0,000833 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,002083 \cdot X_3^2$
Y <sub>6</sub>	$Y_6 = -0,77 + 1,1345 \cdot X_1 + 0,1595 \cdot X_2 + 0,11583 \cdot X_3 - 0,0477 \cdot X_1^2 - 0,005 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,006667 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0103 \cdot X_2^2 - 0,003333 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,005069 \cdot X_3^2$
Y <sub>7</sub>	$Y_7 = 0,15375 + 0,0515 \cdot X_1 + 0,00725 \cdot X_2 + 0,003125 \cdot X_3 - 0,00285 \cdot X_1^2 + 0,0004 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0001667 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,00065 \cdot X_2^2 - 0,00025 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0003125 \cdot X_3^2$
Y <sub>8</sub>	$Y_8 = -0,05125 + 0,09925 \cdot X_1 + 0,0255 \cdot X_2 + 0,027708 \cdot X_3 - 0,00395 \cdot X_1^2 - 0,0018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,001417 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,00035 \cdot X_2^2 - 0,000333 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,000243 \cdot X_3^2$
Y <sub>9</sub>	$Y_9 = 68,3775 - 3,8015 \cdot X_1 - 1,869 \cdot X_2 - 1,64208 \cdot X_3 + 0,1259 \cdot X_1^2 + 0,094 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,04083 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0689 \cdot X_2^2 + 0,005 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,04160 \cdot X_3^2$
Y <sub>10</sub>	$Y_{10} = 1,125 + 0,6625 \cdot X_1 + 0,1325 \cdot X_2 + 0,07917 \cdot X_3 - 0,0235 \cdot X_1^2 - 0,003 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0065 \cdot X_2^2 + 0,001667 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,002431 \cdot X_3^2$
Y <sub>11</sub>	$Y_{11} = 5,21 + 1,7665 \cdot X_1 + 0,4215 \cdot X_2 + 0,19833 \cdot X_3 - 0,0509 \cdot X_1^2 - 0,035 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,02167 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0291 \cdot X_2^2 - 0,015 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,01118 \cdot X_3^2$
Y <sub>12</sub>	$Y_{12} = -58,75 + 21,7 \cdot X_1 + 12,85 \cdot X_2 + 9,375 \cdot X_3 - 0,895 \cdot X_1^2 - 0,85 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,575 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,455 \cdot X_2^2 - 0,3417 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,21875 \cdot X_3^2$

На рисунке 1 представлены поверхности отклика для Y<sub>3</sub> (КМАФАНМ) и Y<sub>12</sub> (ООПК), построенные по полным регрессионным уравнениям. Видно, что Y<sub>3</sub> имеет ярко выраженную область минимума при X<sub>1</sub> ≈ 6–7 мг/л и X<sub>2</sub> ≈ 2–3 мг/л, а Y<sub>12</sub> достигает максимума в сходной области, что подтверждает возможность одновременной оптимизации.

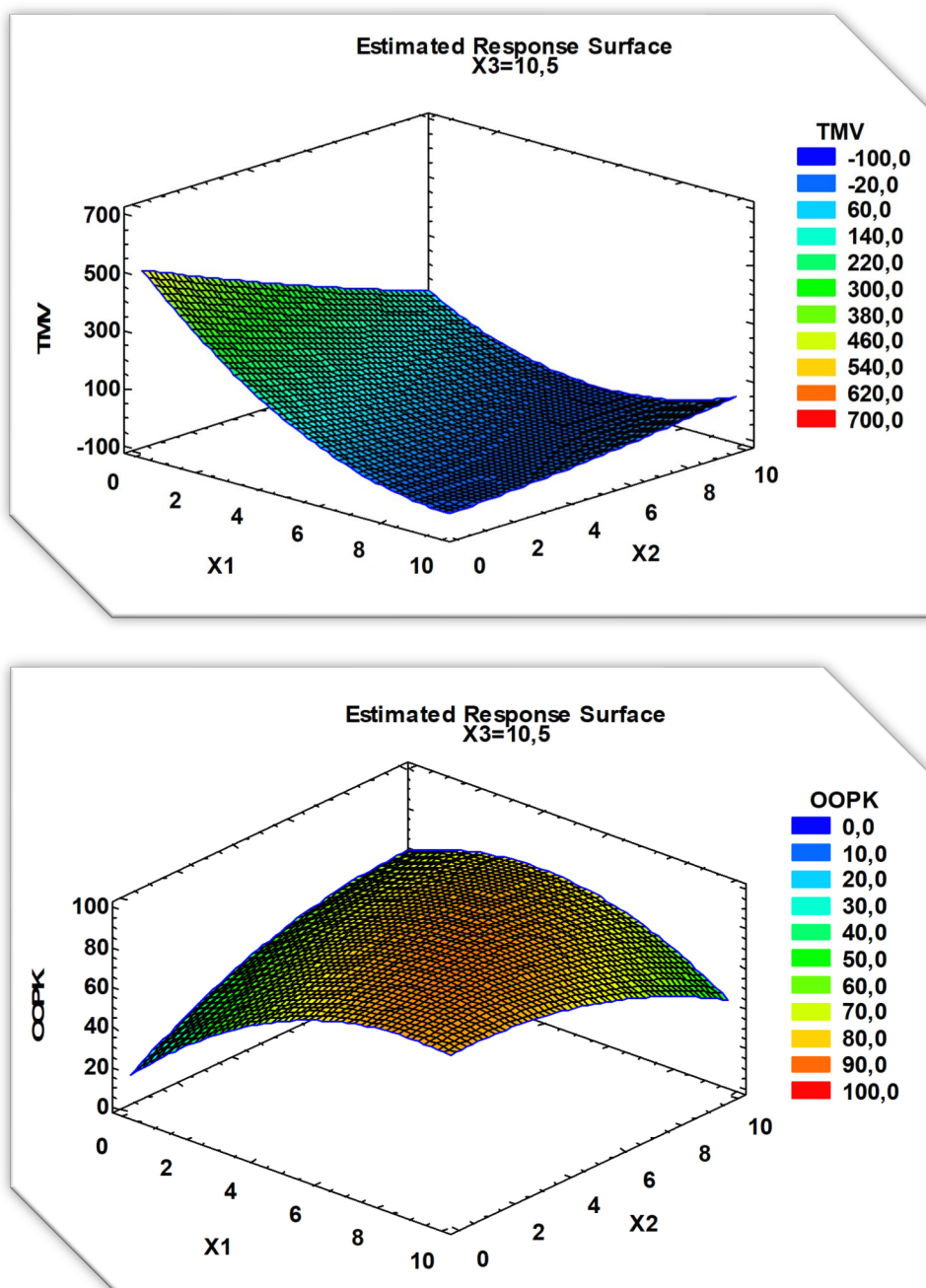


Рисунок 1– Поверхности отклика для  $Y_3$  и  $Y_{12}$  при фиксированном  $X_3 = 10,5$  ч  
 Figure 1. Response surfaces for  $Y_3$  and  $Y_{12}$  at fixed  $X_3 = 10.5$  h

**Влияние параметров обработки на показатели качества.** Анализ полученных регрессионных моделей (таблица 3 и 5) позволяет детально описать влияние каждого фактора на все исследованные показатели. Прежде всего, очевидна доминирующая роль концентрации озона при посоле ( $X_1$ ), повышение которой приводит к снижению влажности  $Y_1$ , что связано с окислительной модификацией белков оболочки икринок: озон, обладая высоким окислительно-восстановительным потенциалом, взаимодействует с сульфгидрильными группами цистеина и метионина, образуя дисульфидные связи и сульфоксиды. Это вызывает частичную денатурацию и агрегацию белков, снижая их гидрофильность и способность удерживать влагу [10]. Одновременно  $X_1$  оказывает сильное бактерицидное действие на микрофлору ( $Y_3$ ): резкое снижение общей бактериальной обсемененности с 530 тыс. КОЕ/г в контроле до 4–5 тыс. КОЕ/г при  $X_1 = 5$  мг/л соответствует высокочувствительной фазе, когда озон разрушает клеточные стенки и мембраны микроорганизмов, а также окисляет внутриклеточные компоненты [5]. Дальнейшее увеличение  $X_1$  до 10 мг/л дает меньший прирост эффекта (насыщение), что отражается в положительном квадратичном члене модели для  $Y_3$ .

Перекисное число  $Y_2$  демонстрирует немонотонную зависимость от  $X_1$ : минимальные значения (около 2,0 ммоль/кг) достигаются при  $X_1 \approx 5-6$  мг/л, что обусловлено инактивацией липоксигеназы – фермента, катализирующего окисление полиненасыщенных жирных кислот. Озон окисляет тиоловые группы в активном центре фермента, подавляя его активность [13]. При более высоких  $X_1$  начинается прямое окисление липидов, что приводит к росту  $Y_2$ . Квадратичные эффекты  $X_2$  и  $X_3$  так же значимы, указывая на то, что чрезмерно интенсивная промывка или слишком длительный посол могут способствовать окислению за счет увеличения времени контакта с растворенным кислородом.

Текстурные характеристики  $Y_4-Y_8$  тесно связаны с состоянием белковой матрицы. Положительные линейные эффекты  $X_1$  и  $X_2$  и отрицательный квадратичный  $X_1^2$  свидетельствуют о том, что увеличение концентрации озона повышает прочностные свойства, но до определенного предела. Окислительная сшивка белков (образование дисульфидных связей и дитиозина) уплотняет структуру, повышая твердость  $Y_4$  и упругость  $Y_8$ . Липкость  $Y_5$  возрастает из-за частичной денатурации поверхностных белков, которые становятся более гидрофобными и склонными к адгезии. Отрицательный эффект времени посола  $X_3$  на  $Y_4$ ,  $Y_6-Y_8$  объясняется постепенным набуханием и размягчением белковой матрицы под действием соли, что частично нивелирует упрочняющий эффект озона. Полученные диапазоны значений текстурных показателей полностью соответствуют литературным данным для икорной продукции [18].

Цветовые координаты  $Y_9-Y_{11}$  изменяются под действием озона вследствие окислительной модификации каротиноидов (астаксантина, кантаксантина) и меланоидинообразования. Светлота  $Y_9$  снижается с увеличением  $X_1$  и  $X_2$ , причем взаимодействие  $X_1X_2$  значимо, что указывает на синергизм двухэтапной обработки. В умеренных концентрациях озон способствует появлению привлекательного янтарного оттенка (рост  $Y_{10}$  и  $Y_{11}$ ), однако при высоких концентрациях ( $X_1 > 8$  мг/л) происходит нежелательное потемнение.

Обобщенный органолептический показатель  $Y_{12}$ , интегрирующий все сенсорные свойства, имеет сложную нелинейную зависимость с максимумом в области  $X_1 \approx 5-6$  мг/л,  $X_2 \approx 2-3$  мг/л,  $X_3 \approx 10-12$  ч. Рост  $Y_{12}$  при увеличении  $X_1$  до 5–6 мг/л обусловлен улучшением микробиологической чистоты и формированием привлекательной текстуры и цвета. Дальнейшее повышение  $X_1$  ведет к ухудшению из-за излишней жесткости, потемнения и появления металлического привкуса, связанного с образованием летучих соединений, таких как 1-октен-3-он, при окислении липидов [13]. Значимость взаимодействий  $X_1X_2$  и  $X_1X_3$  показывает, что эффект от изменения одного фактора зависит от уровней других, что подчеркивает необходимость многокритериальной оптимизации.

Таблица 6. Целевые критерии и весовые коэффициенты для оптимизации

Table 6. Target criteria and weights for optimization

Отклик	Цель	Нижняя граница	Верхняя граница	Целевое значение	Вес
$Y_1$ , %	целевое	54,0	69,2	61,0	3
$Y_2$ , ммоль/кг	минимум	2,0	4,2	–	4
$Y_3$ , $1,0 \cdot 10^3$ КОЕ/г	минимум	1,0	100,0	–	5
$Y_4$ , Н	целевое	6,7	20,5	14,5	3
$Y_5$ , Н·с	минимум	0,8	4,2	–	2
$Y_6$ , Н	целевое	0,9	9,3	6,2	3
$Y_7$	целевое	0,21	0,66	0,48	3
$Y_8$	целевое	0,20	0,79	0,63	3
$Y_9$	целевое	31,2	55,8	42,0	3
$Y_{12}$ , баллы	максимум	20	87	–	5

**Многокритериальная оптимизация.** Целевые критерии для оптимизации выбрали на основе анализа органолептических и физико-химических свойств образцов с наивысшими дегустационными оценками (таблица 6): влажность  $Y_1 = 61\%$  соответствовала образцам с оптимальной сочностью и упругостью; твердость  $Y_4 = 14,5$  Н, жевательность  $Y_6 = 6,2$  Н и упругость  $Y_8 = 0,63$  характерны для икры с плотной, «разбористой» консистенцией; светлота  $Y_9 = 42$  являлась компромиссом между слишком

светлым и излишне темным продуктом. Показателям, определяющим безопасность и стабильность ( $Y_2, Y_3, Y_5$ ), задавали минимизацию, а органолептический показатель  $Y_{12}$  – максимизировали.

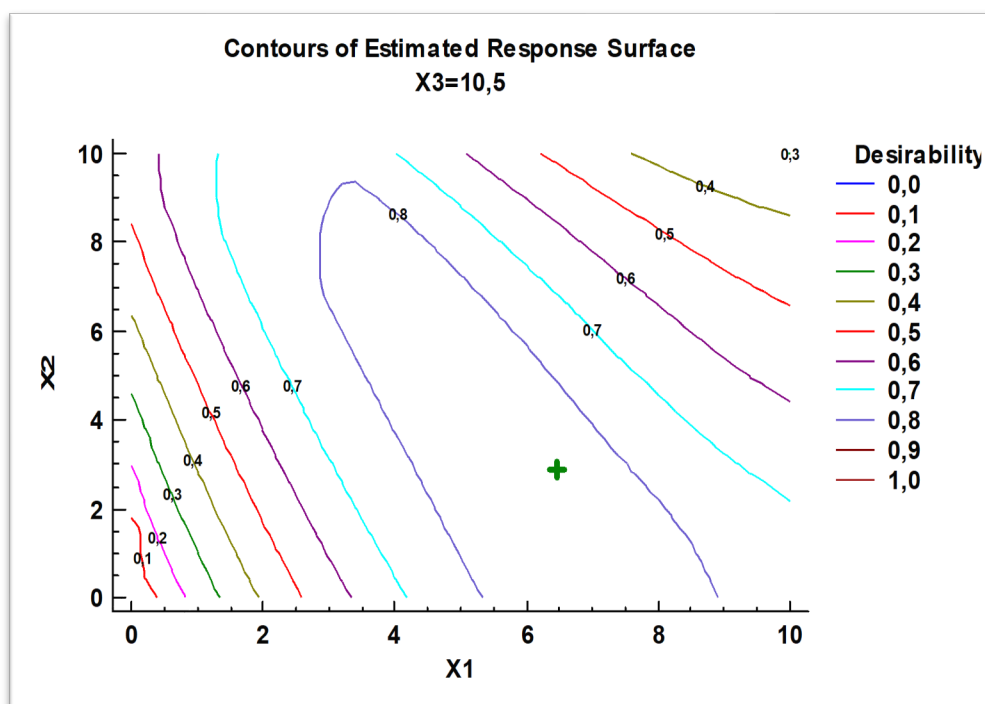


Рисунок 2 – График функции желательности: зависимость общей желательности от факторов  $X_1$  и  $X_2$  при  $X_3 = 10,5$  ч

Figure 2. Desirability function plot: overall desirability versus  $X_1$  and  $X_2$  at  $X_3 = 10.5$  h

Многокритериальная оптимизация методом желательности позволила определить оптимальные уровни факторов:  $X_1 = 6,45$  мг/л,  $X_2 = 2,88$  мг/л,  $X_3 = 10,27$  ч. На рисунке 2 показан график функции желательности, на котором отчетливо виден глобальный максимум вблизи этих значений. Для практической реализации приняты округленные значения:  $X_1 = 6,5$  мг/л,  $X_2 = 3,0$  мг/л,  $X_3 = 10,5$  ч. При этих условиях предсказанные значения откликов и результаты экспериментальной проверки (трехкратная повторность) представлены в таблице 7. Относительная ошибка не превышает 5%, что подтверждает адекватность моделей и воспроизводимость результатов.

Таблица 7. Сравнение предсказанных и экспериментальных значений при оптимальных условиях ( $X_1 = 6,5$  мг/л,  $X_2 = 3,0$  мг/л,  $X_3 = 10,5$  ч)

Table 7. Comparison of predicted and experimental values at optimal conditions ( $X_1 = 6.5$  mg/L,  $X_2 = 3.0$  mg/L,  $X_3 = 10.5$  h)

Показатель	Предсказано	Эксперимент (1 сутки)	Относительная ошибка, %
$Y_1$ , %	61,0	61,3	0,5
$Y_2$ , ммоль/кг	2,03	2,01	1,0
$Y_3$ , $1 \cdot 10^3$ КОЕ/г	3,47	3,52	1,4
$Y_4$ , Н	14,5	14,6	0,7
$Y_5$ , Н-с	2,77	2,80	1,1
$Y_6$ , Н	6,20	6,18	0,3
$Y_7$	0,470	0,472	0,4
$Y_8$	0,623	0,620	0,5
$Y_9$	36,4	36,8	1,1
$Y_{12}$ , баллы	86,4	86,0	0,5

**Динамика показателей при хранении и обоснование срока годности.** Для обоснования предполагаемого срока годности слабосоленой пробойной икры сельди, обработанной по оптимальным режимам, провели исследования в соответствии с методологией, изложенной в МУК 4.2.1847-04. Учитывая, что планируемый срок годности составляет 30 суток, продукт относится к скоропортящимся, и для него применяется коэффициент резерва 1,3 (для сроков годности до 30 суток включительно). Общая продолжительность исследований составила 39 суток. Контрольные точки выбраны с требуемой

периодичностью: фон (1 сутки после выработки), а затем на 10, 20, 30 и 39 сутки хранения при температуре  $2 \pm 2^\circ\text{C}$ . Результаты изменения показателей качества в процессе хранения представлены в таблице 8.

Таблица 8. Показатели качества слабосоленой пробойной икры сельди в процессе хранения при температуре  $2 \pm 2^\circ\text{C}$

Table 8. Quality indicators of light-salted screened herring caviar during storage at a temperature of  $2 \pm 2^\circ\text{C}$

Показатель	Фон (1 сутки)	10 суток	20 суток	30 суток	39 суток	Норматив (ТР ЕАЭС 040/2016)
БГКП (колиформы)	не обнаруж. в 0,1 г	не обнаруж. в 0,1 г	не обнаруж. в 0,1 г	не обнаруж. в 0,1 г	не обнаруж. в 0,1 г	не допускаются в 0,1 г
<i>S. aureus</i>	не обнаруж. в 1,0 г	не обнаруж. в 1,0 г	не обнаруж. в 1,0 г	не обнаруж. в 1,0 г	не обнаруж. в 1,0 г	не допускаются в 1,0 г
Сульфитредуцирующие кlostридии	не обнаруж. в 0,1 г	не обнаруж. в 0,1 г	не обнаруж. в 0,1 г	не обнаруж. в 0,1 г	не обнаруж. в 0,1 г	не допускаются в 1,0 г
дрожжи, КОЕ/г	менее 10	менее 10	менее 10	менее 10	менее 10	не более 50
плесени, КОЕ/г	менее 10	менее 10	менее 10	менее 10	менее 10	не более 300
Y <sub>1</sub> (массовая доля влаги влага), %	61,3	61,1	60,8	60,5	60,2	–
Y <sub>2</sub> (перекисное число), ммоль/кг	2,01	2,05	2,09	2,12	2,15	–
Y <sub>3</sub> (КМАФАнМ), 10 <sup>3</sup> КОЕ/г	3,52	3,48	3,50	3,55	3,60	не более 1·10 <sup>5</sup>
Y <sub>4</sub> (твердость), Н	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2	–
Y <sub>5</sub> (липкость), Н·с	2,80	2,83	2,87	2,90	2,93	–
Y <sub>6</sub> (жевательность), Н	6,18	6,15	6,12	6,08	6,05	–
Y <sub>7</sub> (рассыпчатость)	0,472	0,470	0,468	0,465	0,462	–
Y <sub>8</sub> (упругость)	0,620	0,618	0,615	0,612	0,609	–
Y <sub>9</sub> (светлота L*)	36,8	36,5	36,3	36,0	35,8	–
Y <sub>12</sub> (ООПК), баллы	86	85	84	84	83	–

Из анализа данных таблицы 8 видно, что в течение всего периода наблюдений (39 суток) при температуре  $2 \pm 2^\circ\text{C}$  все контролируемые микробиологические показатели остаются стабильными и не превышают нормативных значений, установленных ТР ЕАЭС 040/2016. Отсутствие роста бактерий группы кишечных палочек, патогенных микроорганизмов, дрожжей и плесеней подтверждает эффективность барьерного действия озонированной воды. Физико-химические и органолептические показатели изменяются незначительно, оставаясь в пределах, обеспечивающих высокое качество продукта.

## Заключение

В результате проведенного исследования с применением методологии поверхности отклика и плана Бокса–Бенкена определены оптимальные параметры двухэтапной обработки слабосоленой пробойной икры сельди тихоокеанской озонированными растворами: концентрация озона при посоле ястыков 6,5 мг/л, концентрация озона при промывке 3,0 мг/л, продолжительность посола 10,5 ч. При этих условиях продукт характеризуется низкой микробной обсемененностью (Y<sub>3</sub> менее 4·10<sup>3</sup> КОЕ/г), минимальным окислением липидов (Y<sub>2</sub> около 2 ммоль/кг), оптимальными текстурными свойствами (Y<sub>4</sub> = 14,5 Н, Y<sub>8</sub> = 0,62) и высокой органолептической оценкой (Y<sub>12</sub> = 86 баллов).

Мониторинг динамики показателей качества и безопасности в течение 39 суток хранения при температуре  $2 \pm 2^\circ\text{C}$  (с учетом коэффициента резерва 1,3) показал стабильность санитарно-показательной микрофлоры, гарантируя срок годности продукции до 30 суток.

## Литература

1. Дементьева Н.В., Богданов В.Д. Исследование технологических показателей икры сельди тихоокеанской // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 3. С. 589–599. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-3-589-599
2. Ким Г.Н., Дементьева Н.В., Богданов В.Д. Сравнительное исследование пищевой ценности икры рыб тихоокеанского бассейна // Рыбное хозяйство. 2016. № 3. С. 102–106.
3. Москвичев А.С., Москвичева Е.В. Разработка технологии функционального паштета на основе побочных продуктов переработки рыбного сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2025. № 1. С. 12–23. DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-1-12-23
4. Копыленко Л.Р. Научное обоснование и разработка технологии консервирования икры осетровых и лососевых рыб: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2006. 50 с.
5. Wei C., Zhang F., Hu Y., Feng C., Wu H. Ozonation in water treatment: The generation, basic properties of ozone and its practical application. *Reviews in Chemical Engineering*. 2017, V. 33, no. 1, pp. 49–89. DOI: 10.1515/revce-2016-0008
6. Aslam R., Alam M.S., Pandiselvam R. Aqueous ozone sanitization system for fresh produce: Design, development, and optimization of process parameters for minimally processed onion. *Ozone: Science & Engineering*. 2022, V. 44, no. 1, pp. 3–16. DOI: 10.1080/01919512.2021.1984206
7. De Mendonça Silva A.M., Gonçalves A.A. Effect of aqueous ozone on microbial and physicochemical quality of Nile tilapia processing. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017, V. 41, no. 6, article e13298. DOI: 10.1111/jfpp.13298
8. Hernandez K.L., Sedas V.P., Dehaibes S.R., Valencia V.S. et al. Improved microbial safety of direct ozone-depurated shellstock eastern oysters (*Crassostrea virginica*) by superchilled storage. *Front Microbiol*. 2018, V. 9, article 2802. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02802
9. Yolmeh M., Jafari S.M. Applications of response surface methodology in the food industry processes. *Food and Bioprocess Technology*. 2017, V. 10, pp. 413–433. DOI: 10.1007/s11947-016-1855-2.
10. Domínguez R., Bermúdez R., Pateiro M., Lucas-González R., Lorenzo J.M. Optimization and characterization of lupin protein isolate obtained using alkaline solubilization-isoelectric precipitation. *Foods*. 2023, V. 12, no. 20, article 3875. DOI: 10.3390/foods12203875
11. Lee H.W., Lu Y., Zhang Y., Fu C., Huang D. Physicochemical and functional properties of red lentil protein isolates from three origins at different pH. *Food Chemistry*. 2021, V. 358, article 129749. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129749
12. Marino M., Maifreni M., Baggio A., Innocente N. Inactivation of foodborne bacteria biofilms by aqueous and gaseous ozone. *Front Microbiol*. 2018, V. 9, article 2024. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02024
13. Choe E., Min D.B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2006, V. 5, no. 4, pp. 169–186. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2006.00009.x
14. Spínola V., Mendes B., Câmara J.S., Castilho P.C. Effect of time and temperature on vitamin C stability in horticultural extracts. UHPLC-PDA vs iodometric titration as analytical methods. *Food Science and Technology*. 2013, V. 50, Is. 2, pp. 489–495. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.08.020
15. AOAC. Official methods of analysis of the AOAC International. 15th ed. Arlington: Association of Official Analytical Chemists, 2004.
16. Ghorbani A., Mahmoudifar K., Shokri S., Mazaheri Y., Shamloo E., Rezagholizade-Shirvan A., Elhamirad A.H. Effect of *Allium Jesdianum*'s extract on the physicochemical, antioxidant, antimicrobial and sensory properties of Sausage characteristics. *Food Chem X*. 2024, V. 22, article 101461. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101461
17. Jackson V., Schilling M.W., Falkenberg S.M. et al. Quality characteristics and storage stability of baked and fried chicken nuggets formulated with wheat and rice flour. *Journal of Food Quality*. 2009, V. 32, pp. 760–774. DOI: 10.1111/j.1745-4557.2009.00279.x
18. Binsi P.K., Nayak N., Sarkar P.C., Sahu U., Lalitha K.V., Ninan G., Ravishankar C.N. Conversion of carp roe mass to caviar substitutes: Stabilization with oregano extract. *LWT*. 2019, V. 108, no. 1, pp. 446–455. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.03.001

## References

1. Dement'eva N.V., Bogdanov V.D. The study of technological parameters of Pacific herring caviar. *Vestnik MGTU*. 2017, V. 20, no. 3, pp. 589–599. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-3-589-599. (In Russian)
2. Kim G.N., Dement'eva N.V., Bogdanov V.D. Comparative study of the nutritional value of caviar of fish from the Pacific basin. *Rybnoe khozyaystvo*. 2016, no. 3, pp. 102–106. (In Russian)
3. Moskvichev A.S., Moskvicheva E.V. Technology of functional pate on the basis of fish processing by-products. *Processes and Food Production Equipment*. 2025, no. 1, pp. 12–23. DOI 10.17586/2310-1164-2025-18-1-12-23 (In Russian)
4. Kopylenko L.R. Scientific substantiation and development of technology for preserving sturgeon and salmon caviar. *Doctor's thesis*. Moscow. 2006. (In Russian)
5. Wei C., Zhang F., Hu Y., Feng C., Wu H. Ozonation in water treatment: The generation, basic properties of ozone and its practical application. *Reviews in Chemical Engineering*. 2017, V. 33, no. 1, pp. 49–89. DOI: 10.1515/revce-2016-0008

6. Aslam R., Alam M.S., Pandiselvam R. Aqueous ozone sanitization system for fresh produce: Design, development, and optimization of process parameters for minimally processed onion. *Ozone: Science & Engineering*. 2022, V. 44, no. 1, pp. 3–16. DOI: 10.1080/01919512.2021.1984206
7. De Mendonça Silva A.M., Gonçalves A.A. Effect of aqueous ozone on microbial and physicochemical quality of Nile tilapia processing. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017, V. 41, no. 6, article e13298. DOI: 10.1111/jfpp.13298
8. Hernandez K.L., Sedas V.P., Dehaibes S.R., Valencia V.S. et al. Improved microbial safety of direct ozone-depurated shellstock eastern oysters (*Crassostrea virginica*) by superchilled storage. *Front Microbiol*. 2018, V. 9, article 2802. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02802
9. Yolmeh M., Jafari S.M. Applications of response surface methodology in the food industry processes. *Food and Bioprocess Technology*. 2017, V. 10, pp. 413–433. DOI: 10.1007/s11947-016-1855-2
10. Domínguez R., Bermúdez R., Pateiro M., Lucas-González R., Lorenzo J.M. Optimization and characterization of lupin protein isolate obtained using alkaline solubilization-isoelectric precipitation. *Foods*. 2023, V. 12, no. 20, article 3875. DOI: 10.3390/foods12203875
11. Lee H.W., Lu Y., Zhang Y., Fu C., Huang D. Physicochemical and functional properties of red lentil protein isolates from three origins at different pH. *Food Chemistry*. 2021, V. 358, article 129749. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129749
12. Marino M., Maifreni M., Baggio A., Innocente N. Inactivation of foodborne bacteria biofilms by aqueous and gaseous ozone. *Front Microbiol*. 2018, V. 9, article 2024. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02024
13. Choe E., Min D.B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2006, V. 5, no. 4, pp. 169–186. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2006.00009.x
14. Spínola V., Mendes B., Câmara J.S., Castilho P.C. Effect of time and temperature on vitamin C stability in horticultural extracts. UHPLC-PDA vs iodometric titration as analytical methods. *Food Science and Technology*. 2013, V. 50, Is. 2, pp. 489–495. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.08.020
15. AOAC. Official methods of analysis of the AOAC International. 15th ed. Arlington: Association of Official Analytical Chemists, 2004.
16. Ghorbani A., Mahmoudifar K., Shokri S., Mazaheri Y., Shamloo E., Rezagholizade-Shirvan A., Elhamirad A.H. Effect of *Allium Jesdianum*'s extract on the physicochemical, antioxidant, antimicrobial and sensory properties of Sausage characteristics. *Food Chem X*. 2024, V. 22, article 101461. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101461
17. Jackson V., Schilling M.W., Falkenberg S.M. et al. Quality characteristics and storage stability of baked and fried chicken nuggets formulated with wheat and rice flour. *Journal of Food Quality*. 2009, V. 32, pp. 760–774. DOI: 10.1111/j.1745-4557.2009.00279.x
18. Binsi P.K., Nayak N., Sarkar P.C., Sahu U., Lalitha K.V., Ninan G., Ravishankar C.N. Conversion of carp roe mass to caviar substitutes: Stabilization with oregano extract. *LWT*. 2019, V. 108, no. 1, pp. 446–455. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.03.001

#### Информация об авторах

Александр Сергеевич Москвичев – канд. техн. наук, доцент, доцент Высшей школы биотехнологий и пищевых производств  
Ирина Алексеевна Тимошенкова – канд. техн. наук, доцент Высшей школы биотехнологий и пищевых производств  
Елена Владимировна Москвичева – канд. техн. наук, доцент, доцент Высшей школы биотехнологий и пищевых производств  
Никита Владиславович Левин – магистр Высшей школы биотехнологий и пищевых производств

#### Information about the authors

Aleksandr S. Moskvichev, Ph.D., Associate Professor of the Higher School of Biotechnology and Food Production  
Irina A. Timoshenkova, Ph.D., Associate Professor of the Higher School of Biotechnology and Food Production  
Elena V. Moskvicheva, Ph.D., Associate Professor of the Higher School of Biotechnology and Food Production  
Nikita V. Levin, Master of the Higher School of Biotechnology and Food Production

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 23.01.2026  
Одобрена после рецензирования 24.02.2026  
Принята к публикации 27.02.2026

The article was submitted 23.01.2026  
Approved after reviewing 24.02.2026  
Accepted for publication 27.02.2026