

УДК644-4

## Влияние металл-лигандного взаимодействия в гемовой группе на цвет форм миоглобина

Д-р техн. наук **Мурашев С.В.** s.murashev@mail.ru,

**Большакова О.С.**

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*В сложных гетерогенных молекулах, состоящих из органической части и включающих ионы металлов, цвет может зависеть от обеих составляющих. Для этого обе части молекулы должны быть оптически активны в видимой части спектра. Оптически активными в видимой области являются ионы переходных металлов, к которым относятся ионы железа, входящие в состав гема миоглобина. Органическая часть сложной молекулы для возникновения цвета содержит систему сопряженных двойных связей определенной протяженности. Цвет целой молекулы должен представлять суперпозицию цветов обеих составляющих сложной молекулы.*

*Изменение цвета при превращении одной формы миоглобина в другую рассматривается с точки зрения металл-лигандного взаимодействия в гемовой группе пигмента. Ион железа в гемовой группе миоглобина одной из шести координационных связей может взаимодействовать с лигандами, имеющими разную поляризуемость. Кроме того, заряд иона железа изменяется в зависимости от формы миоглобина, что влияет на взаимодействие с лигандами, в том числе и на распределение электронной плотности. Поэтому заряд иона железа и его способность связываться с различными лигандами вызывают изменение цвета форм миоглобина.*

*Ключевые слова:* метмиоглобин, миоглобин, оксимиоглобин, ион железа, лиганды и их поляризуемость, цвет форм миоглобина.

---

## Effect of the metal-ligand interaction in the heme group on the colour of myoglobin forms

D.Sc **Murashev S.V.** s.murashev@mail.ru,

**Bolshakova O.S.**

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*In complex heterogeneous molecules consisting of organic part with ions of metal, the color may depend on both components. For this, both parts of the molecule are to be optically active in the visible part of the spectrum. Transition metal ions are optically active in the visible region, which are represented by iron ions, as a part of heme of myoglobin. For the color to exist, the organic part of a complex molecule contains a system of conjugated double bonds of certain extent. The color of a whole molecule should represent a superposition of colors of both components of a complex molecule.*

*The colour shift in case of transformation of one myoglobin form to another is regarded in terms of metal-ligand interaction in the pigment heme group. Iron ion in the myoglobin heme group of one of the six coordinate bonds can interact with ligands which have various polarizabilities. Besides, the iron ion charge changes according to the myoglobin form, which affects the interaction with ligands including the electron density distribution. That is why the iron ion charge and its ability to get bound with various ligands cause the colour shift of myoglobin forms.*

**Key terms:** methmyoglobin, myoglobin, oxymyoglobin, iron ion, ligands and their polarizability, colour of myoglobin forms.

В ранее опубликованных работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] и полученных патентах [9, 10], посвященных исследованию цвета мяса получен и обобщен значительный материал. При этом возникал вопрос о влиянии на цвет миоглобина как органической части гема, так и входящего в его структуру иона железа, который в зависимости от величины заряда имеет различный цвет.

Миоглобин является основным пигментом мяса. Он существует в трех формах, отличающихся между собой по цвету. Формы миоглобина способны к взаимному превращению с соответствующими цветовыми изменениями. В составе миоглобина пигментной группой является гем, представляющий собой комплексное соединение иона железа с 4-х дентатным лигандом порфирином. Изменение заряда комплексообразователя ( $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ ) и последующее связывание кислорода сопровождается изменением цвета миоглобина: коричневый  $\rightarrow$  пурпурный  $\rightarrow$  красный. Цветовые переходы между формами миоглобина связаны с двумя процессами: окислением/восстановлением иона комплексообразователя и изменением его лигандирования.

Для возникновения цвета вещества необходимо избирательное поглощение части или частей видимого спектра из падающего на его поверхность белого света. При этом окраска определяется не поглощенной частью видимого спектра, которая отражается. В зависимости от поглощения определенной части видимого спектра возникает соответствующий цвет вещества, так как не поглощенные части спектра, комбинируясь между собой, создают определенную окраску [11, 12, 13].

Избирательное поглощение части видимого спектра происходит в электронных переходах на более высокие уровни с последующим превращением энергии возбужденных электронов в тепловые колебания, а не в испускание квантов света. Существует несколько вариантов электронных переходов приводящих к образованию цвета вещества [14]. В пигментной группе миоглобина – геме – возможны два вида таких электронных переходов. Во-первых, видимый свет поглощается в переходах  $\pi$ -электронов из основного состояния в возбужденное ( $\pi \rightarrow \pi^*$ ) в протопорфирине IX, координированном с ионом железа и содержащим протяженную, замкнутую систему сопряженных двойных связей. Во-вторых, поглощение света может происходить в

электронных переходах между определенными орбиталями в ионах железа. Следовательно, цвет гемовой группы одновременно зависит от порфиринового кольца и иона металла комплексообразователя. В близком к гему пигменте – хлорофилле в образовании цвета участвуют как порфирин, так и металл комплексообразователь.

Несмотря на значительную близость, в составе и строении хлорофилла и гема имеется ряд отличий. В хлорофилл также входит порфирин, но связанный с ионом магния. Отличие касается и строения порфиринов хлорофилла и гема. Оно заключается в том, что в порфирине гема отсутствует циклопентановое кольцо V, и он не этерифицирован спиртами [15, 16].

Для хлорофилла характерна зеленая окраска, отличающая его от гема. Ее возникновение обусловлено сильным поглощением света в сине-фиолетовой и красной областях видимого спектра [15, 16, 17]. Интенсивное светопоглощение хлорофилла в сине-фиолетовой области обеспечивает резонансная структура порфиринового кольца, тогда как соизмеримое светопоглощение в красной части спектра связано с катионом  $Mg^{2+}$ , а также гидрированием одной из двойных связей порфиринового кольца (положение C<sub>7</sub>–C<sub>8</sub> в D-пиррольном кольце) [15, 16]. Превращение хлорофилла в феофитин сопровождается заменой магния на два атома водорода. Следствием потери магния у феофитина является слабо выраженный красный максимум поглощения, поэтому феофитин в отличие от хлорофилла приобретает буро-оливковый цвет [16]. Таким образом, в образовании цвета близкого к гему пигмента хлорофилла участвуют порфириновое кольцо и ион металла комплексообразователя.

Подобно хлорофиллу тетрапироллами являются цитохромы [17], но в отличие от хлорофилла комплексообразователем в них выступает ион железа. В этом цитохромы близки к мио- и гемоглобину. Однако в отличие от последних железо в цитохромах не способно шестой координационной связью присоединять различные лиганды. Тем не менее, подобно оксимио- и оксигемоглобину цитохромы имеют три полосы поглощения [17]. Они расположены в оптической части спектра также как и в оксипигментах (табл. 1), и поэтому создают красный цвет цитохромов.

Табл. 1

Спектральные характеристики пигментов красного цвета

Пигмент	Положение полосы поглощения, нм		
	полоса λ	полоса β	полоса α
Оксимиоглобин	415 – 418	542 – 543	580 – 582
Оксигемоглобин	415	532 – 535	580
Цитохром <i>a</i>	415 – 430	515 – 530	600 – 605
Цитохром <i>b</i>	415 – 430	515 – 530	560
Цитохром <i>c</i>	415 – 430	515 – 530	550

Нитрозомиоглобин		546	578
Нитрозометмиоглобин		536	576

Замена в порфириновых пигментах иона магния на ион железа приводит к тому, что пропадает полоса поглощения в красной области спектра и появляются две другие полосы поглощения  $\beta$  и  $\alpha$  (табл. 1), обеспечивающие таким пигментам красный цвет. Относительно миоглобина на основании спектров поглощения (рис. 1) можно сделать вывод о том, что все его формы, включая даже метмиоглобин, имеют слабое поглощение в красной области спектра. Следовательно, красный цвет для одних гемовых пигментов и интенсивную красную составляющую в цвете других создает порфирин в сочетании с ионом железа.

Окисление цитохромов ( $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e$ ) снижает в их спектрах интенсивность трех полос поглощения и делает эти полосы более диффузными [17]. У производных миоглобина можно наблюдать аналогичные спектральные изменения при переходе  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ . Из сопоставления спектров поглощения нитрозомиоглобина (рис. 2) и нитрозометмиоглобина (рис. 3) следует, что переход от  $Fe^{2+}$  к  $Fe^{3+}$  слабо влияет на положение полос поглощения, их длина волны остается почти неизменной. Она также почти не изменяется в сравнении с оксипигментами и цитохромами (табл. 1).

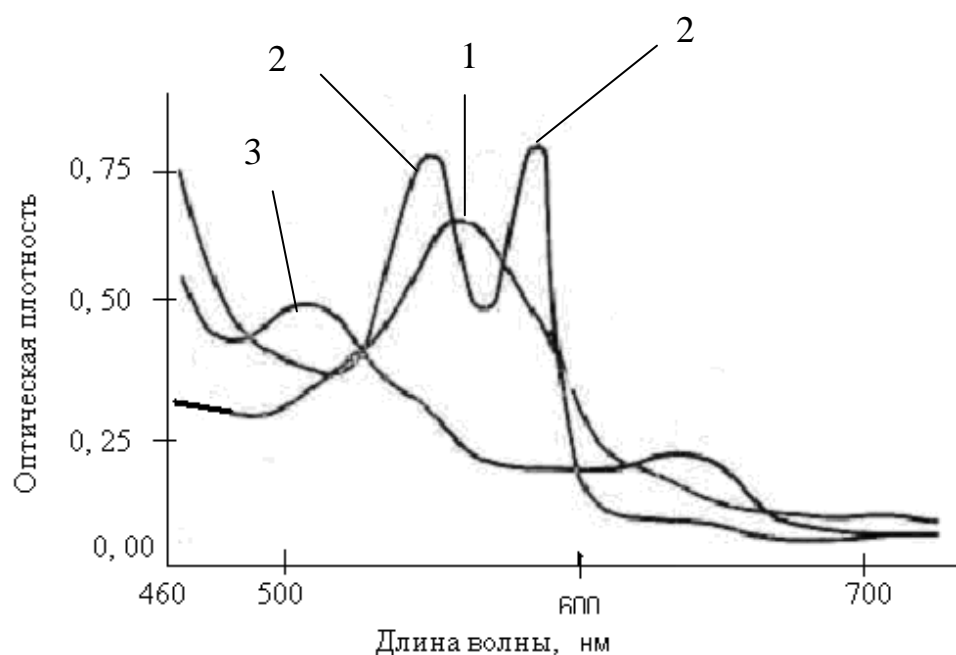


Рис. 1. Спектры поглощения трех форм миоглобина [18]: 1 – миоглобин, 2 – оксимиоглобин, 3 – метмиоглобин.

Основная особенность нитрозометмиоглобина в сравнении с нитрозомиоглобином заключается в менее интенсивных полосах поглощения. Вследствие этого у

нитрозометмиоглобина изменению подвергается преимущественно характеристика цвета связанная с уменьшением степени поглощения света при длинах волн  $\alpha$  и  $\beta$  полос поглощения. Уменьшение поглощения видимого света при любых длинах волн, за исключением длин волн отвечающих красному свету, понизит доминирующее значение последних в цвете красных пигментов. Если говорить более конкретно, то уменьшение поглощения света при длинах волн соответствующих  $\alpha$  и  $\beta$  полосам поглощения приведет к усилению желтой составляющей в цвете пигмента.

Таким образом, красный цвет железопорфириновых пигментов может в определенной мере стабилизироваться, не смотря на окисление комплексообразователя. Вероятно, для стабилизации цвета при переходе восстановленной формы пигмента в окисленную необходимо наличие определенных лигандов. Необходимость присутствия определенных лигандов подтверждается, например, тем, что в ферро- и феррицианидном комплексах переход от  $Fe^{2+}$  к  $Fe^{3+}$  существенно изменяет цвет соединения. Происходит сдвиг поглощения в длинноволновую область. Это изменение цвета в ферро- и феррицианидах происходит не смотря на то, что в обоих случаях все координационные связи железа насыщены только одним видом лиганда.

Следовательно, для цвета железопорфиринов особенно большое значение приобретает шестая координационная связь железа. Ее значение возрастает при окислении иона железа. Эта связь для возникновения красного цвета железопорфиринов должна быть насыщена лигандом с определенной поляризуемостью. Поскольку лиганды имеют различную поляризуемость, то их замена влияет на оптические свойства пигментов. Поэтому потеря кислорода оксимиоглобином и последующее окисление миоглобина вызывают существенные цветовые изменения. Они обусловлены иным расположением полос поглощения, обусловленным заменой шестого лиганда в связи с окислением комплексообразователя, так и самим окислением комплексообразователя.

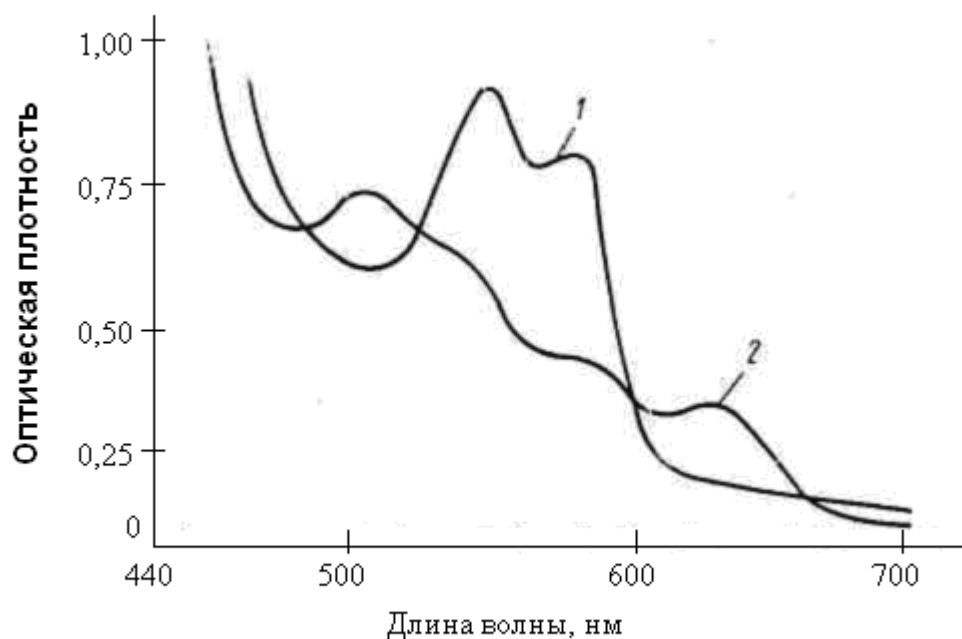


Рис.2. Спектры поглощения [18]: 1 – нитрозомиоглобина, 2 – метмиоглобина.

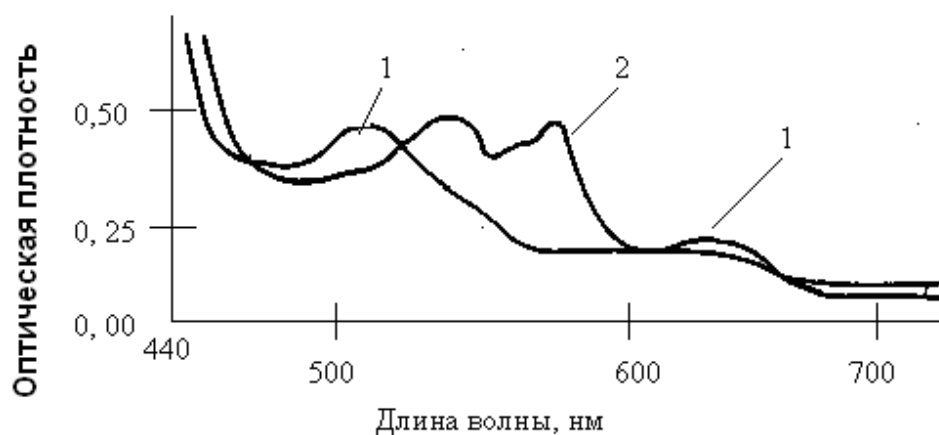


Рис. 3. Спектры поглощения [18]: 1 – метмиоглобина; 2 – нитрозометмиоглобина.

Рассмотрим образование цвета трех форм миоглобина исходя из способности иона железа связываться шестой координационной связью с разными лигандами. При этом возникновение цвета является результатом комбинации не поглощенных порфирином и комплексообразователем участков видимого спектра.

Безводные ионы  $Fe^{2+}$  бесцветны, в то время как гидратированные ионы имеют бледно зеленый цвет [12]. В оксимиоглобине ион  $Fe^{2+}$  координирован с молекулой кислорода, и его цвет определяется взаимодействием комплексообразователя с порфирином и кислородом. Оксимиоглобин превращается в миоглобин в результате

замены кислорода на воду в шестой координационной связи ионов  $Fe^{2+}$ , что сопровождается изменением цвета пигмента с красного на пурпурный или красно-пурпурный [18, 19, 20].

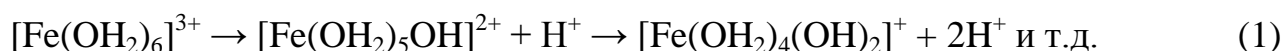
Пурпурный цвет миоглобина представляет комбинацию красного и фиолетового [12]. Эта комбинация возникает вследствие того, что в центральной части спектра миоглобина при длине 555 нм находится полоса поглощения (рис. 1). Она вычитается из видимого спектра и разделяет его на две половины, в результате чего в отраженном свете сохраняются красная и сине-фиолетовая области спектра. Комбинация этих спектральных областей и создает пурпурный цвет миоглобина.

Для возникновения пурпурного цвета необходимо чтобы при превращении оксимиоглобина в миоглобин к отражению красного света добавилось отражение в коротковолновой части видимого спектра при условии, что обе области отражения разделяются полосой поглощения. Возникновение этой новой коротковолновой области отражения может быть связано только с изменением лигандирования иона  $Fe^{2+}$  с молекулярного кислорода на воду.

Действительно, гидратированные ионы  $Fe^{2+}$  имеют бледно-зеленый цвет [12]. Их отражающая способность распространяется не только на зеленую, но и на сине-фиолетовую области спектра (рис. 4). Следовательно, замена молекулярного кислорода на воду способна дополнить уже существующее отражение красного света необходимым для возникновения пурпурного цвета отражением в видимой коротковолновой части спектра.

Однако в результате такой комбинации в длинноволновой части видимого спектра произойдет ослабление доминирования красного света в цвете миоглобина в сравнении с оксимиоглобином. Это обусловлено тем, что гидратированные ионы  $Fe^{2+}$  в длинноволновой области спектра хуже отражают свет (рис. 4). Вероятно по этой причине в красной области оптическая плотность миоглобина больше, чем у оксимиоглобина (рис. 1).

Метмиоглобин имеет коричневый цвет и содержит в гемовой группе ион  $Fe^{3+}$ , координированный в шестом положении с ионом  $OH^-$ . Способность иона железа в гематине (гемине) к взаимодействию с анионами является следствием увеличения его положительного заряда в сравнении с гемом [10]. Ион  $Fe^{3+}$  сам по себе бесцветен [12]. Возникновение цветности в водной среде связано с гидролизом, протекающим по схеме:



В результате гидролиза (1) в непосредственном окружении  $Fe^{3+}$  происходит замена молекул воды на легче деформируемые (поляризуемые) ионы  $OH^-$ . Основные соли  $Fe^{3+}$  имеют желто-коричневую окраску, усиливающуюся по мере гидролиза [12]. Увеличение

числа легче поляризуемых, чем вода ионов  $\text{OH}^-$  в окружении  $\text{Fe}^{3+}$  объясняет усиление окраски. Следовательно, в начальной стадии гидролиза основные соли железа имеют желтый цвет.

Поскольку окраска основных солей  $\text{Fe}^{3+}$  усиливается по мере гидролиза, то на нее влияют как  $\text{H}_2\text{O}$ , так и  $\text{OH}^-$ , т.е. их соотношение в ближайшем окружении  $\text{Fe}^{3+}$ . Это важное положение указывающее на то, что цвет зависит от разных видов лигандов.

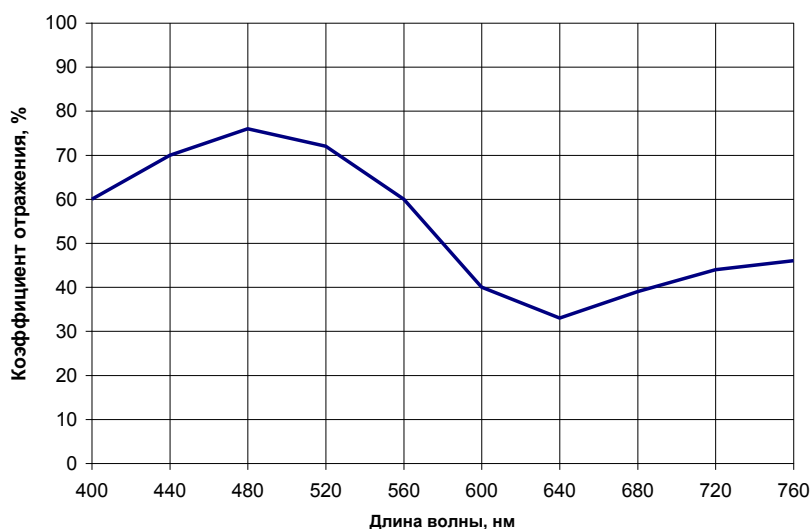
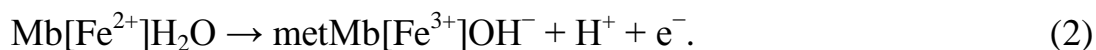


Рис. 4. Спектр отражения гидратированных ионов  $\text{Fe}^{2+}$  (спектр порошка  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  получен на спектрофотометре СФ-18)

В свою очередь превращение миоглобина в метмиоглобин происходит по реакции:



По-существу, реакция (2) представляет собой окисление ( $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$ ) и одновременно она идентична гидролизу по схеме (1), поскольку в том и другом случае происходит отрыв катиона от воды-лиганда с образованием нового лиганда – аниона  $\text{OH}^-$ .

Вследствие гидролиза происходит замена воды связанной с  $\text{Fe}^{2+}$  в геме миоглобина на легче деформируемый ион  $\text{OH}^-$  связанный с  $\text{Fe}^{3+}$  в гематине метмиоглобина. Как и в случае (1) появление иона  $\text{OH}^-$  в окружении  $\text{Fe}^{3+}$  в гематине должно привести к возникновению новой цветовой составляющей. Поскольку реакция (2) соответствует начальной стадии гидролиза по схеме (1), то наиболее вероятно появление отражения в желтой области спектра.

Как уже было сказано, у цитохромов и нитрозопигментов при окислении происходит ослабление полос поглощения. Поэтому при образовании метмиоглобина,



по-видимому, также происходит ослабление полос поглощения. На это указывает отсутствие интенсивных полос поглощения у метмиоглобина по сравнению с миоглобином и оксимиоглобином. Однако главное изменение заключается в том, что у метмиоглобина должна возникнуть цветовая составляющая, связанная с появлением нового лиганда в окружении иона железа в результате гидролиза (2).

Как уже сказано наиболее вероятно, что это желтая составляющая, для которой характерно отражение света в диапазоне 500 – 600 нм, т.е. в той области, в которой расположены  $\alpha$  и  $\beta$  полосы поглощения оксимиоглобина и полоса поглощения миоглобина. Отсутствие поглощения в этом диапазоне, даже при наличии отражения в красной области приведет к потере пигментом красного цвета. Поэтому метмиоглобин не имеет ни красного, ни пурпурного цвета. Кроме того, вследствие увеличения заряда комплексообразователя и сравнительно высокой поляризуемостью иона  $\text{OH}^-$  в спектре поглощения метмиоглобина появляется полоса поглощения при 627 нм, являющаяся наиболее длинноволновой в видимых спектрах всех форм миоглобина.

Таким образом, проведенный анализ показал, что изменение цвета при переходе одной формы миоглобина в другую происходит в результате изменения лигандирования и заряда комплексообразующего иона железа.

### Выводы

Показано, что изменения, происходящие в лигандном окружении комплексообразующего иона железа и изменение его заряда при переходе одной формы миоглобина в другую, вызывают изменения в отражающей и поглощающей способности комплексного иона в видимой области спектра. Это является причиной изменения цвета при превращении одной формы миоглобина в другую.

### Список литературы

1. Мурашев С.В., Воробьев С.А. Обработка свежего мяса аминокислотными лигандами для стабилизации цвета. Мясная индустрия – 2010, №10. – С. 38-40.
2. Жемчужников М.Е., Мурашев С.В. Влияние лактатов натрия и кальция на сохранение цвета мясного сырья. Мясная индустрия – 2010, №11. – С.62-64.
3. Мурашев С.В., Жемчужников М.Е. Исследование цветовых характеристик мясного сырья для оценки антиокислительных свойств дрожжевого экстракта. Все о мясе – декабрь, 2010, № 6. – С. 52-57.

4. Мурашев С.В., Воробьев С.А. Жемчужников М.Е. Моделирование цветовых переходов между формами миоглобина // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2011. № 2. С. 239-247.
5. Воробьев С.А., Мурашев С.В. Использование газовых сред для стабилизации цвета мяса. Мясная индустрия –2011, №8. – С. 52-54.
6. Мурашев С.В., Воробьев С.А. Жемчужникова М.Е. Влияние обработки охлажденного мяса на корреляцию между рН и красным цветом. Всё о мясе. – 2012, №3. – С. 38-41.
7. Мурашев С.В. Влияние структурообразования на связывание воды и механические свойства мясных систем // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 2. С. 162-166.
8. Мурашев С.В. Влияние разрушения структуры коллагена на гидрофильные свойства продуктов этого процесса // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2.
9. Мурашев С.В., Воробьев С.А. Способ стабилизации цвета свежего мяса. Патент РФ № 2410980. Заявл. 21.09.2009. Опубл. 10.02.11. Бюл. № 4.
10. Мурашев С.В., Жемчужников М.Е. Способ стабилизации цвета свежего мяса. Патент РФ № 2416917. Заявл. 21.09.2009. Опубл. 27.04.11. Бюл. № 12.
11. Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения. Ч.2. – М.: Мир, 1988. – 336 с.
12. Некрасов Б. В. Основы общей химии. Т.2. – М.: Химия, 1974. – 688 с.
13. Бабко А.К. Фотометрический анализ. Общие сведения и аппаратура. – М.: Химия, 1968. – 428 с.
14. Мурашев С.В., Воробьев С.А., Жемчужников М.Е. Физические и химические причины возникновения красного цвета мяса // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 2.
15. Пиневиц А.В., Аверина С.Г. Оксигенная фототрофия. – СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2002. – 236 с.
16. Медведев С.С. Физиология растений. – СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2004. – 336 с.
17. Нобел П. Физиология растительной клетки (физико-химический подход). – М.: Мир, 1973. – 288 с.
18. Физико-химические и биохимические основы технологии мяса и мясопродуктов / Справочник под ред. д-ра техн. наук, проф. А.А.Соколова. – М.: Пищевая пром-ть, 1973. – 496 с.
19. Данилова Н.С. Физико-химические и биохимические основы производства мяса и мясных продуктов. – М.: КолосС, 2008. – 280 с.
20. Соколов А.А. Физико-химические и биохимические основы технологии мясопродуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1965. – 490 с.

## References

1. Murashev S.V., Vorob'ev S.A. Processing of fresh meat by aminokislotny ligands for color stabilization. *Myasnaya industriya*. 2010. №10. p. 38-40.
2. Zhemchuzhnikov M.E., Murashev S.V. Influence of lactates of sodium and calcium on preservation of color of meat raw materials. *Myasnaya industriya*. 2010. №11. p. 62-64.
3. Murashev S.V., Zhemchuzhnikov M.E. Research of color characteristics of meat raw materials for an assessment of anti-oxidizing properties of barmy extract. *Vse o myase – dekabr'*. 2010. № 6. p. 52-57.
4. Murashev S.V., Vorob'ev S.A. The colour transitions between the forms of myoglobin simulation. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2011. № 2. p. 239-247.
5. Vorob'ev S.A., Murashev S.V. Use of gas environments for stabilization of color of meat. *Myasnaya industriya*. 2011. №8. p. 52-54.
6. Murashev S.V., Vorob'ev S.A. Zhemchuzhnikova M.E. Influence of processing of the cooled meat on correlation between pH and red color. *Vse o myase*. 2012, №3. p. 38-41.
7. Murashev S.V. The influence of structuring on the binding of water and the mechanical properties of meat systems. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2012. № 2. p. 162-166.
8. Murashev S.V. Influence of destruction of the collagen structure on the hydrophilic properties of this process' products. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2013. № 2.
9. Murashev S.V., Vorob'ev S.A. Way of stabilization of color of fresh meat. Patent RF № 2410980. Zayavl. 21.09.2009. Opubl. 10.02.11. Byul. № 4.
10. Murashev S.V., Zhemchuzhnikov M.E. Way of stabilization of color of fresh meat. Patent RF № 2416917. Zayavl. 21.09.2009. Opubl. 27.04.11. Byul. № 12.
11. Vest A. Chemistry of a solid body. Theory and appendices. Ch.2. M.: Mir, 1988. 336 p.
12. Nekrasov B. V. Fundamentals of the general chemistry. T.2. M.: Khimiya, 1974. 688 p.
13. Babko A.K. Photometric analysis. General information and equipment. – M.: Khimiya, 1968. 428 p.
14. Murashev S.V., Vorob'ev S.A., Zhemchuzhnikov M.E. Physical and chemical reasons of emergence of red color of meat. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2012. № 2.
15. Pinevich A.V., Averina S.G. Oksigenny fototrofiya. – SPb.: Izd-vo SPb un-ta, 2002. 236 p.
16. Medvedev S.S. Physiology of plants. – SPb.: Izd-vo SPb un-ta, 2004. 336 p.
17. Nobel P. Physiology of a plant cell (physical and chemical approach). – M.: Mir, 1973. 288 p.
18. Physical and chemical and biochemical bases of technology of meat and meat products. Spravochnik pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. A.A.Sokolova. – M.: Pishchevaya prom-t', 1973. 496 p.

19. Danilova N.S. Physical and chemical and biochemical bases of production of meat and meat products. – М.: KolosS, 2008. 280 p.
20. Sokolov A.A. Physical and chemical and biochemical bases of technology of meat products. – М.: Pishchevaya promyshlennost', 1965. 490 p.