

Физические и химические причины возникновения красного цвета мяса

С.В. Мурашев, С.А. Воробьев, М.Е. Жемчужников

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий

Рассматриваются пигменты, содержащиеся в мясе, их свойства и влияние на естественный красный цвет мяса. Механизм образования цвета свежего мяса исследуется с точки зрения химии и квантовой биофизики. В несамосветящихся телах, к которым относится и мясо, возникновение цвета происходит в результате избирательного поглощения пигментами части видимого спектра превращающегося в тепло.

Ключевые слова: красный цвет мяса, пигменты, гемопротейны, миоглобин, поглощение света, отражение света, π -сопряженные электронные системы.

Окрашивание веществ в определенный цвет происходит в результате их взаимодействия с видимой частью спектра электромагнитных волн (400 – 750 нм). Этому явлению посвящена обширная литература, в частности, [1, 2, 3]. Образование цвета свежего мяса теплокровных животных более сложный процесс, чем окрашивание неорганических веществ. Сложность обусловлена участием в этом процессе молекулярного кислорода, четырех дентатного лиганда порфирина с обширной системой сопряженных двойных связей, иона железа Fe^{+2} , способного окисляться и других причин. В данной работе образование цвета свежего мяса исследуется с точки зрения химии и квантовой биофизики.

В свежем мясе содержатся разнообразные пигменты, находящиеся в мышечной ткани и крови, поскольку кровь частично остается после обескровливания. Все пигменты мяса можно разделить на несколько групп.

Основную и наиболее многочисленную группу пигментов мяса составляют сложные белки гемо- и гемипротейны, простетическими группами которых являются гем и гемин (гематин), а также продукты их распада. Гем и гемин представляют собой комплексные соединения катионов Fe^{+2} и Fe^{+3} , соответственно, и лиганда порфирина. Окисляясь гем превращается в гемин ($Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$). Переходы между гемом и гемом определяются наличием

восстановителей или окислителей, и они возможны в гемопротеинах, к которым относятся: миоглобин, гемоглобин, цитохромы. В цитохромах передача электрона связана с переходом между двумя состояниями катионов железа: Fe^{+2} и Fe^{+3} . Однако они не способны подобно миоглобину и гемоглобину связывать кислород или другой лиганд, т.к. в этих соединениях у катиона железа уже насыщены все шесть координационных связей. К гемипротеинам относятся ферменты каталаза и пероксидаза. Особенность цитохромоксидазы в том, что она одновременно содержит катионы железа и меди.

Миоглобин является основным пигментом, определяющим цвет свежего мяса, который зависит как от общего содержания миоглобина, так и от соотношения его трех форм. В меньшей степени аналогичное влияние на цвет мяса оказывает гемоглобин [4]. Отличие миоглобина от гемоглобина заключается в том, что гемоглобин тетрамерный белок, а не мономерный как миоглобин, в силу чего гемоглобин слабее взаимодействует с молекулярным кислородом вследствие электронно-конформационного взаимодействия характерного для молекулы гемоглобина [5]. Миоглобин и гемоглобин выполняют функцию переносчиков кислорода и обладают способностью обратимо, без окисления связывать молекулярный кислород. Несмотря на определенные отличия, миоглобин и гемоглобин являются аналогами при взаимодействии с кислородом и по цветовым свойствам.

Миоглобин и гемоглобин существуют в трех формах: оксигенированной, форме лишенной кислорода и окисленной, которые отличаются по цвету. Превращения одной формы в другую сопровождаются изменением цвета. Первая форма имеет красный цвет, вторая пурпурный и третья коричневый. Изменение красного цвета на пурпурный происходит вследствие потери кислорода. Пурпурный цвет превращается в коричневый вследствие окисления Fe^{+2} в Fe^{+3} . Помимо кислорода миоглобин и гемоглобин способны к образованию устойчивых пигментов и с другими лигандами, причем необязательно красного цвета. Например, зеленый пигмент сульфмиоглобин образуется в результате взаимодействия с H_2S . Цитохромы являются пигментами красного цвета.

Структурно близок к гему витамин B_{12} . Отличие заключается в том, что в случае витамина B_{12} комплексообразователем выступает катион кобальта, а хелатирующим лигандом является порфириноподобная структура, содержащая меньшее число сопряженных двойных связей, чем гемовый порфирин. Это делает такую структуру оптически не активной в видимой области. Поэтому

красный цвет витамина В₁₂ возникает благодаря катиону кобальта, а не системе сопряженных двойных связей лиганда. Витамин В₁₂ содержится преимущественно в печени и почках.

К этой же группе примыкают пигменты являющиеся производными гема. При жизни животных биологическое окисление порфирина сопровождается дециклизацией и образованием линейных тетрапирролов – билирубиноидов: биливердина и билирубина. Биливердин имеет желтую окраску, а важнейший продукт распада – билирубин – оранжевую. Из билирубина образуется уробилин, имеющий оранжево-красный цвет. Эти пигменты содержатся в плазме крови. Окислительные процессы в автолизирующих мышцах также приводят к разрыву порфиринового кольца. Первоначально приходит разрыв α -метинового мостика и также образуются линейные тетрапирролы. При более глубоком окислении разрываются другие метиновые мостики. Совокупность этих процессов приводит к образованию продуктов окисления с разнообразной окраской (желтой, зеленой).

В плазме крови животных могут присутствовать каротиноиды, содержание которых определяется особенностями питания. Плазма крови травоядных животных может иметь желто-красный цвет из-за большого содержания каротинов и ксантофилов. Каротиноиды – это пигменты желтого, оранжевого или красного цвета с различными оттенками. Цвет определяется протяженностью системы сопряженных двойных связей. У неокрашенных каротиноидов двойные связи разделены тремя одинарными. У свиней с иным рационом питания, чем травоядные, плазма крови имеет бледно-желтый цвет.

Флавопротеины (ФП) – это сложные белки, простетические группы которых являются производными рибофлавина. Желтый цвет присущ только окисленному состоянию рибофлавина, а восстановленная форма бесцветна. Это связано с тем, что при гидрировании перестает существовать активная в видимой области спектра протяженная система сопряженных двойных связей.

Таким образом, присутствующие в мясе пигменты весьма существенно различаются по своей окраске, которая довольно разнообразна.

Возникновение цвета происходит, в том случае если облучаемое белым светом вещество способно избирательно поглощать часть или части видимого спектра [1, 2, 3]. Поглощенная часть видимого спектра вычитается из падающего на тело белого света. Возникающая при этом окраска определяется не поглощенной частью видимого спектра, которая отражается. В зависимости от поглощения определенной части видимого спектра возникает соответствующий цвет вещества (рис. 1).

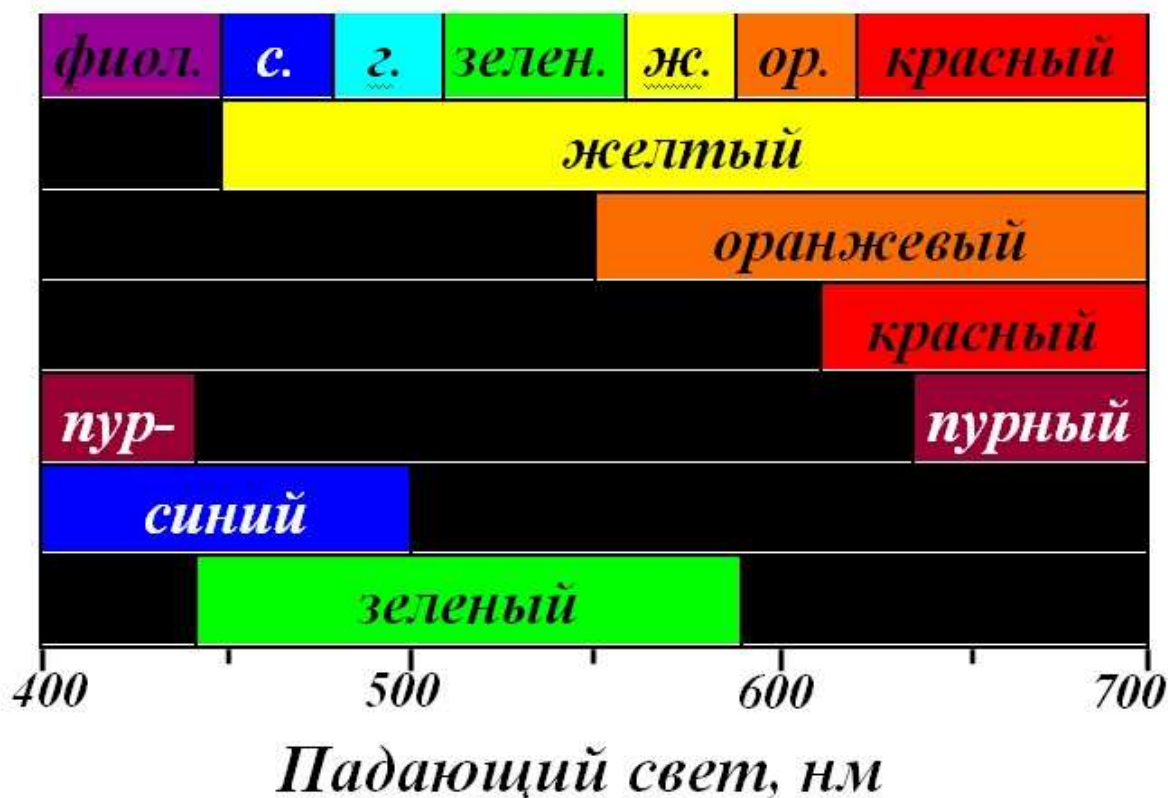


Рис. 1. Область поглощения и отражения видимого света и цвет вещества.

Оставшийся отраженный свет, комбинируясь, придает телу определенную цветную окраску, которую воспринимает человеческий глаз. Отражение света веществом происходит вследствие возбуждения вынужденных колебаний электронов в молекулах электромагнитной волной соответствующей той части видимого спектра, которая не подвергается избирательному поглощению. Несамосветящиеся тела становятся видимыми, именно, благодаря отражению света от их поверхности. Самосвечение в видимой области может быть следствием теплового излучения, но оно наблюдается при высоких температурах и не возможно для мяса. Более значительный интерес с точки зрения возможного влияния на цвет мяса представляет такой вид свечения как фотолюминесценция, поэтому о ней будет сказано ниже.

Для образования цвета важно, что избирательно поглощенный свет превращается в тепло, а не излучается. Это происходит в результате распределения избирательно поглощенной энергии по колебательным уровням энергии, т.е. происходит возбуждение фононов. С помощью фононов для возбужденных атомов и молекул обеспечивается возможность безизлучательных электронных переходов. В релаксационных процессах фононы служат стоком для энергии, запасенной в других степенях свободы, в том числе и в электронных. Таким образом, в результате безизлучательного

рассеивания в виде тепла энергии поглощенных квантов возникает эффект «вычитания» части светового потока падающего на поверхность тела [2, 3].

Электронные переходы возбуждают кванты ультрафиолета или видимого света. Колебательным и вращательным переходам соответствует энергия квантов в инфракрасной области спектра. Следовательно, избирательное поглощение части видимого света при образовании цвета вещества происходит в результате электронных переходов. Последующее возвращение электронов в исходное состояние сопровождается выделением уже не лучистой, а тепловой энергии, что и обуславливает вычитание части видимого света и образование цвета вещества.

Существуют следующие виды электронных переходов, поглощающие энергию квантов в видимой области спектра:

1. электронные переходы между энергетическими зонами: из валентной зоны в зону проводимости через запрещенную зону;
2. электронные переходы между d -орбиталями ионов переходных металлов ($d - d$ переходы);
3. в твердых телах существуют спектральные эффекты в видимой части связанные с нарушением структуры (присутствие примесных ионов, дефектов кристаллической решетки и др.) [1, 2];
4. электронные переходы π -электронов из основного состояния в возбужденное $\pi \rightarrow \pi^*$ в молекулах с протяженными системами сопряженных двойных связей.

Поскольку в состав пигментов входят катионы переходных металлов (Fe, Co, Cu), то необходимо рассмотреть механизмы цветообразования в неорганических веществах. На окраску твердых неорганических веществ большое влияние оказывают электронные переходы через запрещенную зону и наличие $d - d$ переходов. При отсутствии $d - d$ переходов большое значение имеет соотношение ширины запрещенной зоны и энергии фиолетовых квантов (3,02 эВ/квант), которые в видимой области несут максимальную энергию. Если ширина запрещенной зоны превышает энергию фиолетовых квантов, то тогда вещество бесцветно, так как в этом случае электронные переходы между зонами находятся вне видимой части спектра. Например, такая ситуация наблюдается для TiO_2 с шириной запрещенной зоны 3,2 эВ.

Однако и при большой ширине запрещенной зоны, превосходящей энергию фиолетовых квантов, возможно существование цвета при наличии $d - d$ переходов. Например, Cr_2O_3 с шириной запрещенной зоны 3,4 эВ имеет зеленую окраску, так как для хрома характерны $d - d$ переходы. NiO также

имеет зеленую окраску при ширине запрещенной зоны 3,7 эВ из-за $d - d$ переходов у никеля.

Вещества с шириной запрещенной зоны большей, чем энергия красных квантов, но меньшей, чем энергия фиолетовых квантов ($1,8 < \Delta E < 3,0$ эВ) имеют окраску, на которую влияют электронные переходы через запрещенную зону, возбуждаемые квантами видимого света. Примером таких веществ является CdS желтого цвета с шириной запрещенной зоны 2,45 эВ.

Если у вещества ширина запрещенной зоны меньше энергии красных квантов, то оно имеет темный цвет, так как в этом случае поглощается весь видимый спектр. Например, CuO с шириной запрещенной зоны 0,6 эВ имеет черный цвет.

На цвет неорганических соединений оказывают влияние нарушения кристаллической структуры. Например, важным фактором, влияющим на цветность твердых кристаллических соединений, является наличие вакансий в их решетках. Если энергия перехода электрона с аниона на вакансию находится в пределах оптического диапазона, то в результате появляется окраска. Вероятно, окраска окислов тяжелых щелочных металлов имеет именно такой механизм происхождения [2].

Для объяснения возникновения цвета вещества плодотворно привлечение такого понятия как поляризуемость [2], под которой понимается деформация, смещение внешней электронной оболочки под действием электрического поля. Возникновению цвета благоприятно усиление деформации, т.е. подвижности электронов под влиянием внешней силы. Это согласуется с тем фактом, что вычитание части видимого спектра происходит в результате поглощения квантов видимого света, несущих меньшую энергию, чем ультрафиолет, и которой достаточно для возбуждения более подвижных электронов. Повышенной поляризуемостью обладают π -электроны, что и подтверждает их участие в возникновении цвета органических молекул.

Органические молекулы поглощают видимый свет при возбуждении π электронов в системах сопряженных двойных связей. При этом полное сопряжение состоит из π, π -сопряжения и возможного p, π -сопряжения, в котором участвуют неподеленные электронные пары находящиеся на p -орбиталях. Коэффициент поглощения и длина волны полосы поглощения у молекул с двойными связями зависят от протяженности сопряженной системы, ее особенностей, наличия ауксохромных групп. С увеличением числа сопряженных двойных связей в системе возрастает коэффициент поглощения, а максимум полосы поглощения смещается в длинноволновую сторону.

В видимой области поглощают свет только системы с большим количеством двойных связей. При небольшом количестве двойных связей, как например, в ароматических аминокислотах поглощение происходит в ультрафиолетовой области (240 – 300 нм).

У многоатомных молекул с основным синглетным состоянием, к которым относятся и пигменты мяса, не вся энергия возбуждения π -электронов при возвращении в основное состояние выделяется в безизлучательных (тепловых) процессах. Частично она излучается в виде квантов с определенной длиной волны. Поэтому для тканей, содержащих такие молекулы, характерны фотофизические люминесцентные эффекты: флуоресценция и фосфоресценция.

Флуоресценция представляет синглет – синглетное испускание света, когда молекула переходит из первого возбужденного синглетного состояния в основное синглетное состояние



Фосфоресценция представляет триплет – синглетное испускание света, когда молекула переходит из первого возбужденного триплетного состояния в основное синглетное состояние



Фосфоресценция менее вероятна, чем флуоресценция в связи с необходимостью обращения спина электрона при переходе между состояниями с разной мультиплетностью и наблюдается она при меньшей частоте излучаемого кванта ($\nu_1 > \nu_2$), из-за потери электроном части энергии в безизлучательном переходе $S_1^* \rightarrow T_1^*$. Понижение энергии в этом переходе происходит вследствие того, что он энергетически состоит из двух частей: изоэнергетического интеркомбинационного перехода и понижения энергии в ходе колебательно-вращательной релаксации на нулевой колебательный уровень состояния T_1^* .

Возбуждающее излучение на несколько порядков более интенсивно, чем люминесценция клеток. Фотофизические эффекты имеют низкий квантовый выход в связи с тем, что им успешную конкуренцию составляют безизлучательные переходы при возвращении возбужденной молекулы в основное состояние. При этом чистые, извлеченные пигменты флуоресцируют намного сильнее, чем в составе биологических тканей. Более низкий квантовый выход флуоресценции молекул пигментов в составе тканей по сравнению с пигментами, извлеченными из них, может быть обусловлен миграцией энергии, как между одинаковыми, так и между разными молекулами в биологических

тканях в направлении понижения энергетического уровня. Миграция энергии безизлучательным путем не сопровождающаяся химическими изменениями в веществе может происходить по нескольким механизмам: индуктивно-резонансным, обменно-резонансным, экситонным.

Из-за низкого квантового выхода флуоресценция не влияет на цвет биологических тканей, что особенно убедительно можно показать на примере хлорофилла. Хлорофилл, как и гемопротеины, относится к порфиринам, с той разницей, что комплексообразователем в нем является катион магния, и вероятно поэтому, в отличие от гемопорфиринов хлорофилл флуоресцирует красным светом. Для раствора хлорофилла *a* в эфире наблюдаются две полосы красной флуоресценции: главная при 666 нм и более слабая при 728 нм [6]. Однако, не смотря на красную флуоресценцию эфирный раствор хлорофилла *a* имеет голубой цвет, который при разбавлении приобретает зеленый оттенок [7]. Зеленую окраску хлорофиллу придает поглощение света в синей и красной областях спектра. Листья растений благодаря хлорофиллу также имеют зеленый цвет и слабую красную флуоресценцию, наблюдаемую только в затемнении [6]. Поэтому отраженный свет преобладает над красным флуоресцентным свечением и определяет зеленый цвет листьев.

Слабая флуоресценция листьев объясняется тем, что в хлоропластах хлорофилл собран в свето-собирающие комплексы (ССК) для увеличения выхода фотосинтеза, в том числе, и благодаря подавлению нежелательной, в данном случае, флуоресценции. Это следствие взаимного пространственного расположения молекул хлорофилла относительно друг друга в составе ССК, обеспечивающее миграцию энергии к реакционному центру.

Животные ткани способны флуоресцировать в различных областях видимого спектра: синей, зеленой и красной. Синим светом на $\lambda = 460...470$ нм флуоресцируют пиридиннуклеотиды НАДН и НАДФН (в мышечной ткани флуоресценция обусловленная НАДФН незначительна), для ее возбуждения в силу стоковского смещения необходимо облучение ультрафиолетом с $\lambda = 365$ нм. Окисление НАДН сопровождается потерей способности флуоресцировать. Окисленные ФП флуоресцируют в зеленой области на $\lambda = 520...530$ нм, для которого также необходимо облучение ультрафиолетом с $\lambda = 365$ нм или синим светом. Восстановленные ФП утрачивают способность флуоресцировать.

НАДН и ФП являются компонентами электронно-транспортных цепей. Их переходы между окисленным и восстановленным состояниями в процессе транспорта электронов связаны со способностью к флуоресценции. В состоянии покоя, при угнетении дыхания преобладают восстановленные

формы, вследствие чего наблюдается усиление синей флуоресценции НАДН и ослабление зеленой флуоресценции ФП животных тканей. В состоянии анаэробноза остаются только восстановленные формы компонентов дыхательных цепей [8].

В синей и зеленой области могут флуоресцировать и другие соединения. Это фолиевая кислота, витамин А и др. Для их флуоресценции характерны те же общие закономерности, что и для пиридиннуклеотидов и ФП.

Рассмотрение сине-зеленой флуоресценции показывает, что помимо низкого квантового выхода для ее возникновения необходимо облучение ультрафиолетом. Ультрафиолет интенсифицирует окислительные процессы и выцветание мяса, вследствие чего полимерные материалы, используемые для упаковки мяса, должны создавать для него барьер. Кроме того, в облучении ультрафиолетом нет необходимости в связи с тем, что цвет возникает при взаимодействии вещества с видимой частью спектра. Следовательно, флуоресценция животных тканей в синей и зеленой области видимого света невозможна и она не повлияет на цвет мяса.

Красная флуоресценция присуща, прежде всего, порфиринам. Однако для гемопротеинов красная флуоресценция невозможна. В гемовых порфиринах красная флуоресценция гасится ионом железа, входящим в состав гема. Для выявления характерной красной флуоресценции порфиринов катион железа необходимо удалить. Это можно сделать с помощью обработки серной кислотой [9]. Гашение красной флуоресценции гемовых порфиринов ионом железа, по-видимому, происходит в силу $d - d$ переходов, свойственных ионам переходных элементов.

Таким образом, в силу низкого квантового выхода и отсутствия необходимых условий для возбуждения флуоресценции цвет мяса формируется только по механизму избирательного поглощения и отражения остальной части видимого спектра. Флуоресценция и цветообразование несамосветящихся веществ происходят по принципиально противоположным механизмам. При флуоресценции частично используется энергия возбуждения электронов для излучения квантов, а в несамосветящихся веществах цвет возникает в результате рассеивания в безизлучательных процессах избирательно поглощенной энергии части видимого спектра.

В соответствии со схемой на рис. 1 красный цвет вещества возникает, если из видимого спектра поглощается значительная часть от фиолетового до желтого и частично оранжевый, а не поглощенная часть отражается. Поглощение именно этой части видимого спектра и обеспечивает миоглобин и

в особенности оксимиоглобин, на долю которого, что очень важно, приходится 90 % всех пигментов мяса [4]. Если бы пигментов с иным цветом было больше, то они могли бы экранировать миоглобин и влиять на цвет мяса.

Цвет миоглобина и гемоглобина при обратимом связывании кислорода определяется порфириновым кольцом. При этом очень важно сохранение структуры порфирина в кислородном окружении. Окислению порфирина молекулярным кислородом препятствует различие мультиплетности их основного состояния. У молекулярного кислорода основное состояние триплетное, а у порфирина синглетное. Поэтому для активизации окисления необходим переход кислорода в синглетное состояние или порфирина в триплетное состояние. Кислород из основного триплетного состояния может перейти в одно из двух возбужденных синглетных состояний, отличающихся расположением внешних электронов, энергией и временем жизни [10]. Состояние с большей энергией имеет очень малое время жизни и его участие в реакциях маловероятно. Синглетное состояние кислорода с меньшей энергией имеет большее время жизни и ему соответствует сравнительно небольшая энергия в инфракрасной области [10]. Практически любая органическая молекула в триплетном состоянии способна сенсibilизировать образование синглетного кислорода.

Однако если порфирин перейдет в триплетное состояние, то отпадет необходимость в образовании синглетного кислорода, так как триплетный порфирин беспрепятственно сможет реагировать с кислородом находящимся в основном триплетном состоянии. Следовательно, сенсibilизация кислорода не обязательна, а переход порфирина в триплетное состояние происходит в результате первоначальной фотосенсibilизации в возбужденное синглетное состояние с последующим переходом в триплетное состояние. Такие процессы, вероятно, реализуются при фотовыцветании мяса.

Фотоокислению мяса особенно способствует желтая часть видимого спектра (560 – 610 нм), а в зеленом и красном свете окраска меняется мало [4]. Ультрафиолет ускоряет окисление.

Влияние оксигенирования на поглощение видимого света можно проиллюстрировать на примере гемоглобина и оксигемоглобина, спектры которых представлены на рис. 2 и взяты из работы [8]. Гемоглобин не связанный с кислородом имеет две полосы поглощения, а оксигенированный три полосы поглощения и располагаются они таким образом, что боковые полосы смещаются, соответственно, в фиолетовую и оранжевую сторону. Вследствие этого при оксигенировании расширяется диапазон поглощения

видимого света до значений необходимых в соответствии со схемой на рис. 1 для образования красного цвета.

Восстановление метмиоглобина в миоглобин сопровождается превращением коричневого цвета в пурпурный. Коричневый цвет является комбинацией красного цвета и зеленого, а пурпурный цвет является комбинацией фиолетовой и красной составляющих видимого спектра (рис. 1). После связывания кислорода миоглобином, как и гемоглобином, происходит расширение и усиление области поглощения (рис. 2), в результате чего в отраженном свете остается только красная часть видимого спектра.

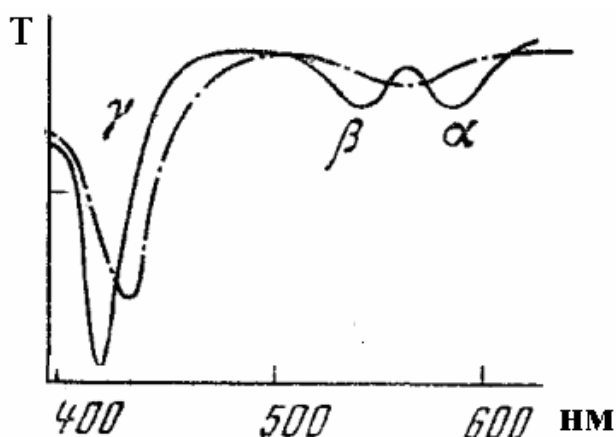


Рис. 2. Влияние связывания кислорода на поглощение видимого света гемоглобином.

Восстановление метмиоглобина в миоглобин сопровождается превращением коричневого цвета в пурпурный. Коричневый цвет является комбинацией красного цвета и зеленого, а пурпурный цвет является комбинацией фиолетовой и красной составляющих видимого спектра (рис. 1). После связывания кислорода миоглобином, как и гемоглобином, происходит расширение и усиление области поглощения (рис. 2), в результате чего в отраженном свете остается только красная часть видимого спектра.

Таким образом, при переходе от метмиоглобина к оксимиоглобину красная составляющая в цвете мяса усиливается, и в конечном счете остается единственной и определяющей. Другие пигменты в условиях мяса не обладают способностью к обратимому связыванию кислорода с сопутствующими изменениями цвета. Их контакт с кислородом представляет опасность для системы сопряженных двойных связей вследствие окисления и изменения или потери окраски. Поэтому усиление красного цвета свежего мяса возможно только с помощью миоглобина и в меньшей степени гемоглобина.

Список литературы

1. Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения. Ч.2. – М.: Мир, 1988. – 336 с.
2. Некрасов Б. В. Основы общей химии. Т.2. – М.: Химия, 1974. – 688 с.
3. Бабко А.К. Фотометрический анализ. Общие сведения и аппаратура. – М.: Химия, 1968. – 428 с.
4. Соколов А.А. Физико-химические и биохимические основы технологии мясопродуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1965. – 490 с.
5. Финкельштейн А.В., Птицын О.Б. Физика белка. – М.: Книжный дом «Университет», 2002. – 376 с.
6. Нобел П. Физиология растительной клетки (физико-химический подход). – М.: Мир, 1973. – 288 с.
7. Болотов В.М., Нечаев А.П., Сарафанова Л.А.. Пищевые красители: классификация, анализ, свойства, применение. – СПб.: ГИОРД, 2008. – 240 с.
8. Карнаухов
9. Самойлов В.О.. Медицинская биофизика. – СПб.: СпецЛит, 2004. – 496 с.
10. Рубин А.Б. БИОФИЗИКА: В 2 т. Т. 2.:Биофизика клеточных процессов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 469 с.

Physical and chemical reasons of meat red color appearance

Murashov S.V., Vorobyov S.A., Zhemchuzhnikov M.E.

Saint-Petersburg State University of Refrigeration
and Food Engineering

The paper considers pigments contained in meat, their properties and effect on natural red color of meat. The mechanism creating fresh meat color is analyzed from the point of view of chemistry and quantum biophysics. In non self-luminous bodies, to which meat belongs, the color emerges as a result of pigments selectively absorbing a part of visible spectrum that turns into heat.

Keywords: meat red color, pigments, hemoproteins, myoglobin, light absorption, light reflection, π -adjoint electronic systems.