

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пушкинский государственный естественно-научный институт»  
Факультет биофизики и биомедицины

На правах рукописи

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**БИОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ФАГО- И ПИНОЦИТОЗА  
НА МОДЕЛИ ПЛОСКИХ ЧЕРВЕЙ ПЛАНАРИЙ**

**Направление подготовки**

**06.04.01 Биология**

**Профиль**

**«Биофизика и медико-биологические науки»**

Выполнил(а) студент(ка) \_\_\_\_\_ / Нефедова С.Е./

Научный руководитель

доцент ПушГЕНИ, к.б.н. \_\_\_\_\_ / Тирас Х.П./

«Работа допущена к защите»:

Декан факультета  
чл.-корр. РАН,  
профессор \_\_\_\_\_ Г.Р. Иваницкий

Пушино, 2020 г.

## Содержание

Введение.....	3
1. Обзор литературы.....	5
1.1 Планария как тест-система для изучения фагоцитоза и регенерации.....	5
1.1.1 Филогения, биоразнообразие и анатомия планарий .....	5
1.1.2 Молекулярные механизмы фагоцитоза у планарий.....	13
1.2. Объекты и методы исследования ..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	4
1.2.1 Регистрация хемилюминесценции как метод исследования. <b>Ошибка!</b>	
<b>Закладка не определена.</b>	
1.2.2 Цветометрия и спектофотометрия как методы исследования.....	35
1.2.3 Морфометрия как метод исследования .....	72
2 Методика исследования.....	77
2.1 Метод регистрации хемилюминесценции.....	77
2.2 Спектофотометрический метод исследования.....	79
2.3 Цветометрический метод исследования.....	80
2.4 Метод прижизненной компьютерной морфометрии.....	83
3. Результаты и обсуждения.....	85
3.1 Анализ динамики ССФЭ при регенерации и фагоцитозе.....	85
3.2 Анализ динамики ССФЭ при регенерации.....	86
3.3 Анализ динамики размерных показателей при регенерации.....	87
3.4 Анализ динамики морфометрических показателей при регенерации планарий под действием разных концентраций пептида FMLP.....	89
3.5 Микроспектрофотометрическое исследование спектральных характеристик фагоцитирующих планарий.....	93
3.6 Цветометрический анализ влияния температуры на фагоцитоз.....	95
3.7 Цветометрический анализ регенерации планарий.....	104
3.8 Цветометрический анализ адаптационных реакций планарий.....	110
Заключение .....	114
Список литературы.....	116

## Введение

Планарии представляют собой уникальную тест-систему, поскольку обладают непревзойденными способностями к регенерации; они способны образовывать новый организм даже из небольшого фрагмента тела. Эта способность к регенерации обусловлена тем, что в их организме около четверти всех клеток являются стволовыми. Стволовые клетки планарий (необласты) запускают процесс морфогенеза.

Активный морфогенез также сопровождает процесс фагоцитоза у планарий: как показали исследования, после поступления пищи их кишечник распадается на отдельные клетки, в каждой из которых происходит процесс внутриклеточного пищеварения (фаго- и пиноцитоза) с участием комплекса Гольджи и лизосомо-ферментативной системы клетки. По истечении трех суток происходит самосборка кишечника – фагоцитоз завершается.

Таким образом, основные физиологические процессы планарий (фагоцитоз и регенерация) имеют в своей основе механизм морфогенеза. Уникальные биологические особенности планарий позволяют изучать эти процессы *in vivo* на организменном уровне, с применением неинвазивных методов. Неинвазивные методы являются наиболее чувствительными, они дают возможность изучать физиологическое состояние планарий в различных условиях, рассматривать быстрые и медленные реакции как организма в целом, так и локальные, протекающие в отдельных органах и тканях. Это предопределило выбор темы данного исследования.

Цель данной работы: разработка методики неинвазивного биофотонического контроля физиологических процессов у планарий на модели целого организма *in situ*.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Разработка алгоритма анализа цветометрических и микрофотоспектральных характеристик организма.

2. Изучение фагоцитоза и регенерации планарий в различных условиях через анализ динамики размерных и биофотонических показателей (сверхслабая фотонная эмиссия (ССФЭ), характеристики цвета).

Итак, объектом данного исследования является плоский червь планария *G. tigrina* (царство *Animalia*, тип *Platyhelminthes*, класс *Rhabditophora*, отряд *Tricladida*, подотряд *Continenticola*, семейство *Dugesiiidae*, род *Girardia*). Предмет исследования - основные физиологические процессы планарии в различных условиях.

В работе применены следующие методы исследования

- 1) метод регистрации сверхслабой фотонной эмиссии (ССФЭ);
- 2) микрофотоспектральный метод;
- 3) метод цифровой биоцветометрии;
- 4) метод прижизненной компьютерной морфометрии.

Актуальность и новизна данного исследования подтверждается тем, что фагоцитоз является основой внутриклеточного питания и иммунного ответа живого организма, а изучение регенерации важно для развития регенеративной медицины. При этом неинвазивные исследования физиологических процессов на уровне являются более. Однако на уровне целого организма динамика фагоцитоза и регенерации не исследовалась. В данной работе впервые для исследования фагоцитоза и регенерации планарий *Girardia tigrina* на организменном уровне применены чувствительные неинвазивные биофотонические методы: микрофотометрический и цветометрический.

Работа выполнена на 142 страницах, содержит 10 таблиц, 76 рисунков, 252 источника литературы.

# 1. Обзор литературы

## 1.1 Планария как тест-система для изучения фагоцитоза и регенерации

### 1.1.1 Филогения, биоразнообразие и анатомия планарий

Планарии - это группа червей с уплощенной формой тела, которая относится к типу Platyhelminth (платы=фиксированная; гельминты=черви), к отряду трехветвистокишечные турбеллярии Tricladida<sup>1</sup> (рис.1.1)

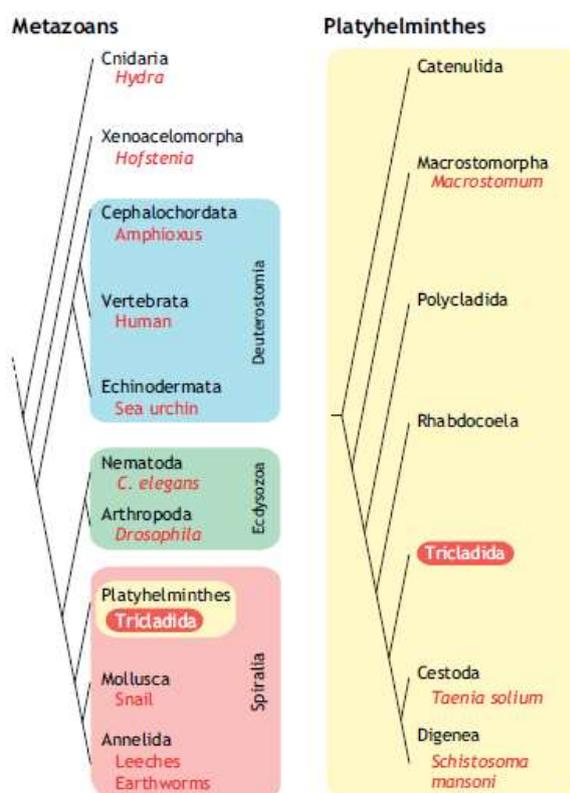


Рис. 1.1 Филогения планарий.

Слева: упрощенная филогенетическая связь между плоскими червями (тип гельминта) и основными таксономическими группами многоклеточных животных. В рамках выделены важнейшие таксоны. Красным текстом написаны наиболее известные (модельные) представители видовые конкретные таксонов. Справа: упрощенные филогенетические отношения между планариями (Tricladida) и другими основными таксономическими группами плоских червей<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Sluys, R. and Riutort, M. (2018). Planarian diversity and phylogeny. *Methods Mol. Biol.* 1774, 1-56. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_1

<sup>2</sup> Mario Ivankovic, Radmila Haneckova, Albert Thommen, Markus A. Grohme, Miquel Vila-Farré, Steffen Werner, Jochen C. Rink Model systems for regeneration: planarians. *Development* (2019) 146, dev167684. doi:10.1242/dev.167684 <https://dev.biologists.org/content/146/17/dev167684.article-info>

В мире насчитывается несколько тысяч видов планарий, обитающих в различных средах: в море, в пресных водах и на суше<sup>1</sup>.

**Анатомия и физиология планарий.** В отличие от других классов плоских червей, таких, как ленточные черви или двуустки, планарии не являются паразитами. С точки зрения внутренней организации они представляют собой трехслойных животных со сложной внутренней анатомией (рис. 1.2).

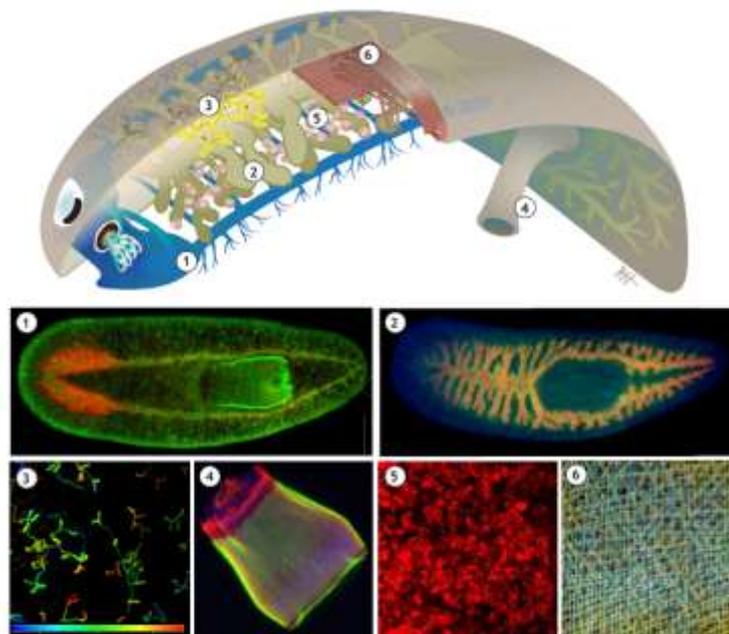


Рис. 1.2 **Анатомия планарий:** основные системы органов (схематические (вверху) и микроскопические *in situ* изображения (внизу)): 1 - мозг, ЦНС и глотка, 2 - кишечник, 3 - протонефридия (глубинно-кодированная конфокальная максимальная проекция, показывающая отдельные протонефридиальные единицы (ацетилованный тубулиновый иммуностейнинг); 4 - глотка (красное - фаллоидиновое окрашивание мышечного актина; зеленое - ацетилованно-тубулиновый иммуностейнинг, реснички - синий, ядерный контрейлинг); 5 - необласты (красная конфокальная максимальная проекция гибридизации PIWI-1 *in situ* в области хвоста; 6 - мускулатура стенок тела (глубинно-кодированная конфокальная максимальная проекции 6G10 иммуноное окрашивание<sup>2</sup>).

<sup>1</sup> Vila-Farré, M. and Rink, J. C. (2018). The ecology of freshwater planarians. *Methods Mol. Biol.* 1774, 173-205. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_3

<sup>2</sup> Ross, K. G., Omuro, K. C., Taylor, M. R., Munday, R. K., Hubert, A., King, R. S. and Zayas, R. M. (2015). Novel monoclonal antibodies to study tissue regeneration in planarians. *BMC Dev. Biol.* 15, 2. doi:10.1186/s12861-014-0050-9

Системы органов планарий включают истинный мозг, соединенный с вентральными нервными комиссурами и простыми глазными бокалами, которые придают планариям их характерную косоглазую внешность<sup>12</sup>.

Планарии также обладают сильно разветвленной кишечной системой, состоящей из трех основных ветвей<sup>3</sup> что отражено в названии отряда (Tricladida: tri = три + cladida = ветви), и протонефридиальной выделительной системой с интересными гомологами почек позвоночных<sup>4</sup>.

Планарии поглощают пищу через мышечную глотку, расположенную на вентральной стороне тела в специальном кармане. Глотка является единственным отверстием тела планарий, поэтому она также выполняет функцию ануса. Кровеносная и дыхательная системы у планарий отсутствуют<sup>5</sup>. Трехслойная мышечная стенка тела, в свою очередь, подобно оболочке окружает мезенхиму и обеспечивает как механическую стабильность, так и структурирующую информацию для ниже лежащих клеток<sup>67</sup>.

Планарии, как правило, обладают гермафродитной половой системой, которая состоит из пары яичников, расположенных позади головного мозга, яиц и желточных желез вдоль всей передне-задней оси, а также копулятивных органов

---

<sup>1</sup> Cebrià, F. (2007). Regenerating the central nervous system: how easy for planarians! *Dev. Genes Evol.* 217, 733-748. doi:10.1007/s00427-007-0188-6

<sup>2</sup> Umesono, Y. and Agata, K. (2009). Evolution and regeneration of the planarian central nervous system. *Dev. Growth Differ.* 51, 185-195. doi:10.1111/j.1440-169X.2009.01099.x

<sup>3</sup> Forsthoefel, D. J., Park, A. E. and Newmark, P. A. (2011). Stem cell-based growth, regeneration, and remodeling of the planarian intestine. *Dev. Biol.* 356, 445-459. doi:10.1016/j.ydbio.2011.05.669

<sup>4</sup> Thi-Kim Vu, H., Rink, J. C., McKinney, S. A., McClain, M., Lakshmanaperumal, N., Alexander, R. and Sánchez Alvarado, A. (2015). Stem cells and fluid flow drive cyst formation in an invertebrate excretory organ. *eLife* 4, e07405. doi:10.7554/eLife.07405

<sup>5</sup> там же.

<sup>6</sup> Scimone, M. L., Cote, L. E. and Reddien, P. W. (2017). Orthogonal muscle fibres have different instructive roles in planarian regeneration. *Nature* 551, 623-628. doi:10.1038/nature24660

<sup>7</sup> Witchley, J. N., Mayer, M., Wagner, D. E., Owen, J. H. and Reddien, P.W. (2013). Muscle cells provide instructions for planarian regeneration. *Cell Rep.* 4, 633-641. doi:10.1016/j.celrep.2013.07.022

в хвосте<sup>12</sup>. Однако среди планарий также распространены бесполое размножение путем партеногенеза или деления тела, в основе которого лежит регенерация<sup>3</sup>. Бесполое размножение, которое размножаются путем деления, часто имеют слабо развитые репродуктивные органы, как, например, клональные лабораторные расы планарии *S. mediterranea* и *D. japonica*<sup>4</sup>

Размеры тела разных видов планарий колеблются от величин, меньших, чем 1 мм в длину, до значений, больших 1 м. Кроме того, сильная межвидовая изменчивость свойственна форме и окраске тела планарий, а также количеству и анатомическому расположению глаз и других систем органов<sup>5</sup>.

Многие плоские черви в условиях недостатка пищи значительно уменьшаются в размерах, тогда как обычно они сохраняют обычные пропорции и размеры своего тела<sup>67</sup>. По данным исследователей, при продолжительном голодании животное может уменьшиться в размерах в 5–10 и более раз. При этом количество его клеток уменьшается пропорционально; например, *Dugesia tigrina* длиной 7 мм, состоящая примерно из 520 000 клеток, может уменьшиться до особи длиной всего 2 мм, и ее тело при этом будет состоять всего из 60 000 клеток, при этом пропорции количества и распределения различных типов клеток будут соответствовать таковым у молодого животного. Таким образом, как считают ученые, голодающий червь, возможно, возвращается к своему ювенильному состоянию<sup>8</sup>. Более того, исследования показывают, что многие плоские

---

<sup>1</sup> Newmark, P. A., Wang, Y. and Chong, T. (2008). Germ cell specification and regeneration in planarians. *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* 73, 573-581. doi:10.1101/sqb.2008.73.022

<sup>2</sup> Sluys, R. and Riutort, M. (2018). Planarian diversity and phylogeny. *Methods Mol. Biol.* 1774, 1-56. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_1

<sup>3</sup> Vila-Farré, M. and Rink, J. C. (2018). The ecology of freshwater planarians. *Methods Mol. Biol.* 1774, 173-205. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_3

<sup>4</sup> Pongratz, N., Storhas, M., Carranza, S. and Michiels, N. K. (2003). Phylogeography of competing sexual and parthenogenetic forms of a freshwater flatworm: patterns and explanations. *BMC Evol. Biol.* 3, 23. doi:10.1186/1471-2148-3-23

<sup>5</sup> там же.

<sup>6</sup> Buguñà, J. and Romero, R. (1981). Quantitative analysis of cell types during growth, degrowth and regeneration in the planarians *Dugesia mediterranea* and *Dugesia tigrina*. *Hydrobiologia* 84, 184-191. doi:10.1007/BF00026179

<sup>7</sup> Newmark, P. A. and Sánchez Alvarado, A. (2002). Not your father's planarian: a classic model enters the era of functional genomics. *Nat. Rev. Genet.* 3, 210-219. doi:10.1038/nrg759

<sup>8</sup> см. 4.

черви периодически увеличивают и уменьшают размеры своего тела с целью адаптации к отсутствию пищи и другим негативным факторам окружающей среды<sup>1</sup>.

**Планарии как модельные системы для изучения регенерации.** Регенерация - это восстановление как структуры, так и функции органов и тканей после их повреждения или утраты части. Процессы регенерации могут идти на самых разных уровнях организации живой системы, поэтому различают внутриклеточную регенерацию; клеточную регенерацию; тканевую регенерацию; регенерацию на органном уровне. также регенерация делится на физиологическую и репаративную. Физиологическая регенерация - это регенерация биологических структур после их естественного износа при нормальном функционировании. Репаративная регенерация - это восстановление биологических структур после повреждения (усиленная физиологическая регенерация). Она включает процессы распада поврежденных клеток, дифференцировку сохранивших жизнеспособность клеток, их пролиферацию, вторичную дифференцировку размножившихся клеток, установление межклеточных связей и адаптационную перестройку клеток регенерата.

Все плоские черви, включая свободноживущие виды (планарий) обладают уникальными способностями к регенерации и в связи с этим представляют собой важный объект для изучения ее механизмов<sup>2 3 4</sup>.

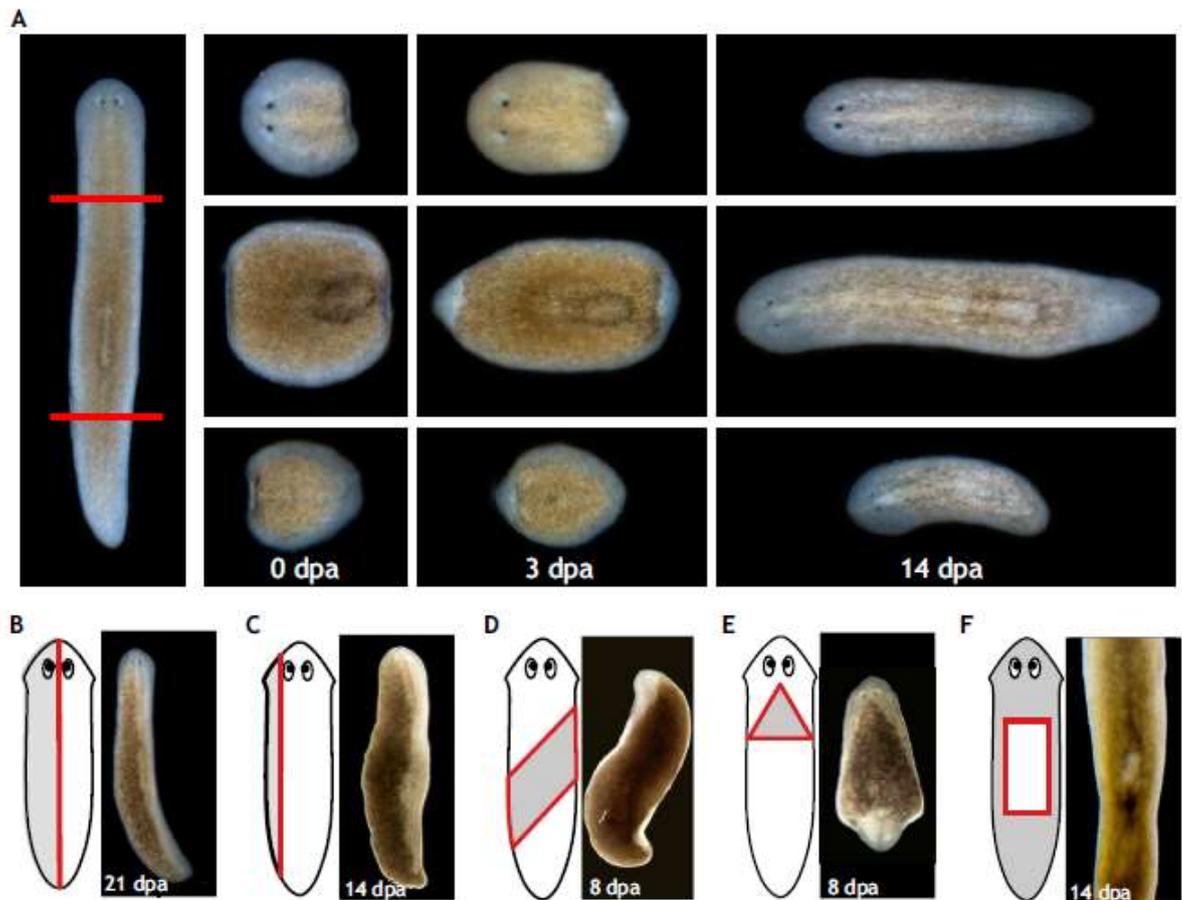
---

<sup>1</sup> Baguña, J. and Romero, R. (1981). Quantitative analysis of cell types during growth, degrowth and regeneration in the planarians *Dugesia mediterranea* and *Dugesia tigrina*. *Hydrobiologia* 84, 184-191. doi:10.1007/BF00026179

<sup>2</sup> Liu SY, Selck C, Friedrich B, Lutz R, Vila-Farre M, Dahl A, Brandl H, Lakshmanaperumal N, Henry I, Rink JC. Reactivating head regrowth in a regeneration-deficient planarian species. *Nature*. 2013; 500:81–84. [PubMed: 23883932]

<sup>3</sup> Sikes JM, Newmark PA. Restoration of anterior regeneration in a planarian with limited regenerative ability. *Nature*. 2013; 500:77–80. [PubMed: 23883929]

<sup>4</sup> Umesono Y, Tasaki J, Nishimura Y, Hrouda M, Kawaguchi E, Yazawa S, Nishimura O, Hosoda K, Inoue T, Agata K. The molecular logic for planarian regeneration along the anterior-posterior axis. *Nature*. 2013; 500:73–76. [PubMed: 23883928]



**Рис. 1.3 Регенерация планарий.**

A - регенерация фрагментов головы (сверху), туловища (посередине) и хвоста (снизу), полученных путем ампутации интактного тела планария *Schmidtea mediterranea* (слева; красные линии указывают приблизительные плоскости резания). Указаны временные точки в днях после ампутации (ДПА). BF - регенерация фрагментов тканей после ампутации/травмы, как показано на рисунках (серый цвет указывает на регенерирующую часть; красные линии указывают на плоскость разреза). Хотя промежуточные моменты времени показаны для D и E, все фрагменты в конечном итоге восстанавливают нормальные пропорции тела<sup>1</sup>.

Способность планарий к регенерации отмечают многие исследователи. Например, если планарию разрезать на три части (рис. 1.3A), каждая из частей регенерирует обратно в полноценное и идеально пропорциональное животное примерно в течение 2 недель. В случае хвостовой (нижней) части это влечет за собой новообразование головы с мозгом, глазами и функциональными органами,

<sup>1</sup> там же

связанными нейронными связями с уже существующей тканью. Также регенерация головной (верхней) части повлечет формирование туловища и хвоста. Центральный (средний) фрагмент тела должен восстановить как голову, так и хвост; тот факт, что они всегда формируются на передней и задней частях изделия соответственно, указывает на то, что процесс регенерации определен полярностью уже существующих тканей<sup>1</sup>.

Планарии способны регенерировать ткани своего тела по медиально-латеральной (M-L) оси. Животные, разрезанные вдоль средней линии, восстанавливают недостающую половину всех парных органов (рис. 1.3B) и даже тонкие боковые срезы, которые должны сформировать среднюю линию, способны восстанавливать двустороннюю симметрию (рис. 1.3C). Кроме того, планарии могут восстановить идеальные пропорции тела даже после диагональных (рис. 1.3D), треугольных разрезов (рис. 3E) или вырезанных «окон» (рис. 1.3F)<sup>2</sup>.

Процесс регенерация может идти в широком диапазоне размеров. Более 100 лет назад Т. Х. Морган сообщил о регенерации фрагмента, который он оценивал как 1/279-я от животного-донора<sup>3</sup>, более поздние исследования установили нижний предел размера способного к регенерации фрагмента на уровне менее чем 10 000 клеток. Так, исследователи<sup>4</sup> показали, что фрагмент тела бесполой *Dugesia dorotoccephala* (7-12 мм) размером всего 0,08 мм<sup>3</sup> в результате регенерации может полностью восстановить размеры своего тела.

Регенеративные способности видов планарий сильно различаются: от сильной регенерации всего тела, как у *Schmidtea mediterranea* или *Dugesia japonica*, до анатомически ограниченных регенеративных способностей (например, отсутствие регенерации головы в задней половине тела у *Dendrocoelum*

---

<sup>1</sup> Mario Ivankovic, Radmila Haneckova, Albert Thommen, Markus A. Grohme, Miquel Vila-Farré, Steffen Werner, Jochen C. Rink Model systems for regeneration: planarians. *Development* (2019) 146, dev167684. doi:10.1242/dev.167684 <https://dev.biologists.org/content/146/17/dev167684.article-info>

<sup>2</sup> там же.

<sup>3</sup> Morgan, T. (1898). Experimental studies of the regeneration of *Planaria maculata*. *Arch. Entw. Mech. Org.* 7, 364-397. doi:10.1007/BF02161491

<sup>4</sup> Montgomery JR, Coward SJ. On the minimal size of a planarian capable of regeneration. *Trans Amer Micros Soc.* 1974; 93:386-391.

lacteum или почти полное отсутствие регенерация у *Bdelloura Candida* и других морских планарий<sup>12</sup>. Модельные виды *S. mediterranea* и *D. japonica* были разработаны именно благодаря их способности к надежной и быстрой регенерации всего тела<sup>345</sup>, и оба вида, следовательно, до сих пор пользуются повышенным вниманием ученых.

Однако, хотя регенерация планарий является чрезвычайно надежной, иногда случаются ошибки: например, после операции можно получить двуглавых или двусторонних «монстров», которые часто являются результатом операции по разделению переднего или заднего конца животных<sup>6</sup>. Более того, даже «почти бессмертные» планарии имеют слабые места в регенерации: в модельных видах, отобранных именно по их способности к сильной регенерации, не способны к регенерации кончик головы перед глазами и глотка<sup>7</sup> и эти фрагменты ткани, следовательно, умирают, если их отделить от остальной части животного. Другие планарии имеют анатомически ограниченные регенеративные способности: например, отсутствует регенерация головы в хвостовом фрагменте тела животного вообще не способно к регенерации<sup>89</sup>.

---

<sup>1</sup> Brøndsted, H. V. (1969). *Planarian Regeneration*. Oxford, New York: Pergamon Press.

<sup>2</sup> Vila-Farré, M. and Rink, J. C. (2018). The ecology of freshwater planarians. *Methods Mol. Biol.* 1774, 173-205. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_3

<sup>3</sup> Newmark, P. A. and Sánchez Alvarado, A. (2002). Not your father's planarian: a classic model enters the era of functional genomics. *Nat. Rev. Genet.* 3, 210-219. doi:10.1038/nrg759

<sup>4</sup> Rink, J. C. (2018). Stem cells, patterning and regeneration in planarians: selforganization at the organismal scale. *Methods Mol. Biol.* 1774, 57-172. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_2

<sup>5</sup> Saló, E. and Agata, K. (2012). Planarian regeneration: a classic topic claiming new attention. *Int. J. Dev. Biol.* 56, 3-4. doi:10.1387/ijdb.123495es

<sup>6</sup> Randolph, H. (1897). Observations and experiments on regeneration in planarians. *Arch. Entw. Mech. Org.* 5, 352-372. doi:10.1007/BF02162271

<sup>7</sup> Reddien, P. W. and Sánchez Alvarado, A. (2004). Fundamentals of planarian regeneration. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 20, 725-757. doi:10.1146/annurev.cellbio.20.010403.095114

<sup>8</sup> Brøndsted, H. V. (1969). *Planarian Regeneration*. Oxford, New York: Pergamon Press.

<sup>9</sup> Vila-Farré, M. and Rink, J. C. (2018). The ecology of freshwater planarians. *Methods Mol. Biol.* 1774, 173-205. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_3

Однако, даже несмотря на очень надежный процесс планарной регенерации, в ней случаются нарушения: например, в результате продольного разделения только переднего или только заднего конца тела животных можно наблюдать развитие двуглавых или двухвостых «монстров»<sup>1</sup>.

Кроме того, даже обладающие надежным механизмом регенерации модельные виды планарий, выбранные именно благодаря их способности к регенерации, имеют «слабые места»: кончик головы перед глазами и глотка не способны к регенерации<sup>2</sup> и эти фрагменты ткани гибнут, если их отделить от части тела животного. Другие виды планарий имеют анатомически ограниченные регенеративные способности (например, отсутствует регенерация головного фрагмента у задней части тела) или совсем не способны к регенерации<sup>34</sup>.

Таким образом, в целом планарии предлагают широкие экспериментальные возможности для изучения регенерации. Виды, обладающие способностью к сильной и быстрой регенерации всего тела, являются модельной системой для изучения универсальных аспектов регенерации, как, например, механизмы сигнала о повреждении, способ его восприятия другими отделами и частями тела и их реакции. Кроме того, сравнительный анализ видов, обладающих слабой способностью к регенерации или не обладающих совсем, дает возможность понять базовые причины возникновения дефектов процесса регенерации и, вероятно, также эволюционное формирование этого процесса, то есть почему одни виды обладают способностью к регенерации, а другие - нет.

### **1.1.2 Молекулярные механизмы регуляции регенерации планарий**

Необыкновенная способность планарий к регенерации объясняется наличием большого количества плюрипотентных стволовых клеток - необластов. Необласты представляют собой маленькие (7-12 мкм в диаметре) круглые клетки

---

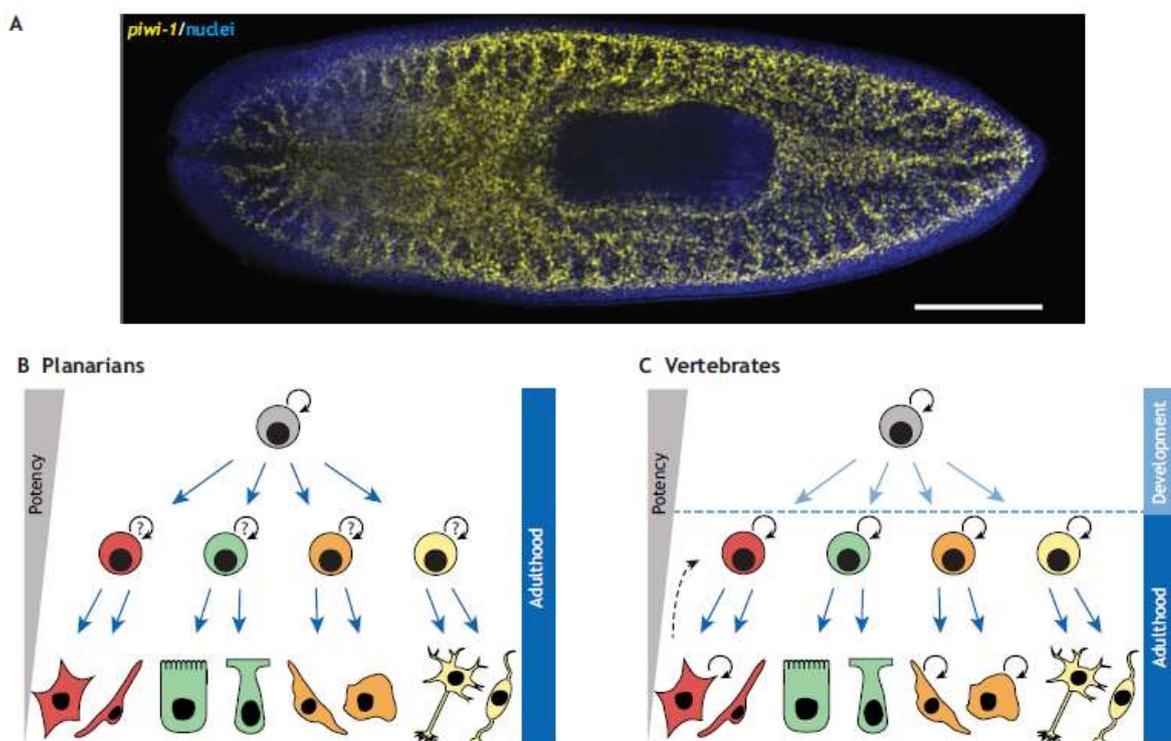
<sup>1</sup> Brøndsted, H. V. (1969). Planarian Regeneration. Oxford, New York: Pergamon Press.

<sup>2</sup> Reddien, P. W. and Sánchez Alvarado, A. (2004). Fundamentals of planarian regeneration. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 20, 725-757. doi:10.1146/annurev.cellbio.20.010403.095114

<sup>3</sup> Saló, E. and Agata, K. (2012). Planarian regeneration: a classic topic claiming new attention. *Int. J. Dev. Biol.* 56, 3-4. doi:10.1387/ijdb.123495es

<sup>4</sup> Newmark, P. A. and Sánchez Alvarado, A. (2002). Not your father's planarian: a classic model enters the era of functional genomics. *Nat. Rev. Genet.* 3, 210-219. doi:10.1038/nrg759

с высоким ядерно-цитоплазматическим объемным соотношением, распространенные в мезенхиме вокруг органов и составляющие около 1/4 от общего количества клеток<sup>1</sup>.



**Рис. 1.4 Система стволовых клеток планарий**

А - цельноорганизменная гибридизация, выделяющая локализацию неопластов, которые визуализируются с использованием универсального маркера *piwi-1* (*smedwi-1*; желтый), окрашенного DAPI (синий) для выделения ядер. Шкала: 500 мкм.

В, С - схемы, позволяющие сравнить ключевые организационные особенности систем стволовых клеток у планарий и у позвоночных животных. У взрослых планарий (В) бесконечно самообновляющиеся плюрипотентные с-необласты (серые клетки, верхний уровень), вероятно, дают начало предшественникам не изученного в настоящее время потенциала самообновления (средний уровень), которые затем окончательно дифференцируются в различные типы постмитотических клеток (нижний уровень). У позвоночных (С) самообновляющиеся плюрипотентные стволовые клетки (серые клетки, верхний уровень) встречаются только временно на ранних стадиях развития; поэтому множественные мультипотентные стволовые клетки сохраняются у взрослых (средний уровень) и окончательно дифференцируются в различные, иногда митотически активные, типы клеток (нижний уровень).

<sup>1</sup> Bagnù, J. and Romero, R. (1981). Quantitative analysis of cell types during growth, degrowth and regeneration in the planarians *Dugesia mediterranea* and *Dugesia tigrina*. *Hydrobiologia* 84, 184-191. doi:10.1007/BF00026179

Необласты часто имеют филоподие-подобные образования и, что интересно, содержат выдающиеся гранулы РНК - белка (хроматоидные тела), по морфологическим свойствам и молекулярному составу сходные с гранулами РНК - белка, обнаруженными в половых клетках многих животных.

Эксперименты показали, что стволовые клетки планарии можно разделить на две рентген-чувствительные фракции, различающиеся по размеру цитоплазмы и количеству ДНК: в первую группу, включающую в себя клетки в S/G2/M-фазах, исследователи относят недифференцированные необласты, так и необласты, прошедшие первичную дифференцировку; во вторую (клетки в G0/G1-фазах) - особый тип стволовых клеток, отличающихся малым размером, наличием нескольких хроматоидных телец и ядер, обогащенных гетерохроматином. Для этих групп необластов митотическая активность наступает одновременно. Важно учитывать, что планария *Girardia tigrina* относится к миксоплоидным видам: часть ее клеток, включая и необласты, являются диплоидными, а другая часть – триплоидными<sup>1</sup>.

По заключению ученых, пресноводные планарии (*Platyhelminthes*, *Turbellaria*, *Tricladida*) бросают вызов современным представлениям о биологической индивидуальности. Полученные исследователями данные о строении и развитии пресноводных планарий позволяют сделать вывод, что взрослые интактные планарии, по сути, не являются отдельными особями, но признаки биологической индивидуальности несут их тотипотентные стволовые клетки (необласты). Необласты в пределах одного планарного тела, в частности, генетически гетерогенны, автономны, способны мигрировать и фактически обладают бессмертностью. С одной стороны, они тесно взаимодействуют между собой в сохранении тела планарии как постоянной среды обитания, с другой - конкурируют между собой, стремясь сделать эту среду максимально благоприятной для выживания их собственных линий необластов. Результаты исследований свидетель-

---

<sup>1</sup> Собственная хемилюминесценция необластов планарии в процессе регенерации / Х.П. Тирас [и др.] // - Биофизика. - 2015. - Т. 60. - № 5. - С. 975-980.

ствуют о том, что планарии не полностью завершили переход к многоклеточности, а представляют собой промежуточную форму, в которой небольшое количество генетически-гетерогенных, репродуктивно-компетентных клеток эффективно «выращивают» свое репродуктивно-некомпетентное потомство<sup>1</sup>.

Примечательно, что трансплантации только одного необласта в организм хозяина, не имеющего запаса стволовых клеток, достаточно для восстановления полноценного животного через постепенную замену всех клеток хозяина потомками трансплантированного необласта<sup>2</sup>. Этот эксперимент убедительно демонстрирует, что необластная фракция содержит плюрипотентные стволовые клетки, способные давать начало всем взрослым типам клеток (эти необласты называют клоногенные или с-необласты).

Необласты - не только источник всех типов взрослых клеток, но и фактически единственный источник новых клеток в планариях<sup>3</sup>, т.к. среди соматических клеток только необласты способны делиться<sup>4</sup>. Поэтому необласты необходимы для регенерации, и их гибель (например, путем облучения) полностью блокирует регенерацию. Более того, кончик головы и глотка, лишённые необластов, являются единственными частями тела, не способными к регенерации<sup>5</sup>.

Необласты также важны для поддержания анатомии планарий при отсутствии ранения. Непрерывные деления необластов и их потомство постоянно за-

---

<sup>1</sup> Fields, C., Levin, M., (2018), Are planaria individuals? What regenerative biology is telling us about the nature of multicellularity, *Evolutionary Biology*, 45(3): 237–247.

<sup>2</sup> Wagner, D. E., Wang, I. E. and Reddien, P. W. (2011). Clonogenic neoblasts are pluripotent adult stem cells that underlie planarian regeneration. *Science* 332, 811-816. doi:10.1126/science.1203983

<sup>3</sup> Tanaka, E. M. and Reddien, P. W. (2011). The cellular basis for animal regeneration. *Dev. Cell* 21, 172-185. doi:10.1016/j.devcel.2011.06.016

<sup>4</sup> Forsthoefel, D. J., Park, A. E. and Newmark, P. A. (2011). Stem cell-based growth, regeneration, and remodeling of the planarian intestine. *Dev. Biol.* 356, 445-459. doi:10.1016/j.ydbio.2011.05.669

<sup>5</sup> Baguña, J. (2012). The planarian neoblast: the rambling history of its origin and some current black boxes. *Int. J. Dev. Biol.* 56, 19-37. doi:10.1387/ijdb.113463jb

меняют все дифференцированные типы клеток. Более того, после каждого приема пищи частота базального деления необластов сильно увеличивается<sup>1</sup>, и результирующий рост постмитотических предшественников приводит к всплеску роста на уровне организма. Необластные деления продолжают голодать, но скорость базального деления недостаточна для замены всех клеток, и, следовательно, размер животных уменьшается из-за чистой потери клеток<sup>2</sup>.

Важная роль необластов как единственного источника новых клеток для регенерации и динамики гомеостатической ткани ставит вопрос о том, как организовать упорядоченную дифференцировку всех типов взрослых клеток из одной популяции плюрипотентных стволовых клеток<sup>3</sup>. В отличие от взрослых стволовых клеток позвоночных, которые поставляют потомство для сравнительно небольшого числа тканеспецифических клеточных линий, каждый отдельный с-необласт потенциально может дать сотни типов взрослых клеток (рис. 4В, С). Недавние исследования, детализирующие экспрессию генов в отдельных необластах, в совокупности демонстрируют начало спецификации клонирования у *piwi-1*-позитивных и чувствительных к облучению необластов<sup>45</sup>, составляющих гетерогенную клеточную популяцию. Селективная экспрессия ряда генов, часто транскрипционных факторов с эволюционно консервативными ролями в спецификации линии, определяет ряд подклассов экспрессирующих *piwi-1* необ-

---

<sup>1</sup> Newmark, P. A. and Sánchez Alvarado, A. (2000). Bromodeoxyuridine specifically labels the regenerative stem cells of planarians. *Dev. Biol.* 220, 142-153. doi:10. 1006/dbio.2000.9645

<sup>2</sup> Thommen, A., Werner, S., Frank, O., Philipp, J., Knittelfelder, O., Quek, Y., Fahmy, K., Shevchenko, A., Friedrich, B. M., Jülicher, F. et al. (2019). Body size-dependent energy storage causes Kleiber's law scaling of the metabolic rate in planarians. *eLife* 8, 420. doi:10.7554/eLife.38187

<sup>3</sup> Rink, J. C. (2018). Stem cells, patterning and regeneration in planarians: selforganization at the organismal scale. *Methods Mol. Biol.* 1774, 57-172. doi:10. 1007/978-1-4939-7802-1\_2

<sup>4</sup> Hayashi, T., Shibata, N., Okumura, R., Kudome, T., Nishimura, O., Tarui, H. and Agata, K. (2010). Single-cell gene profiling of planarian stemcells using fluorescent activated cell sorting and its "index sorting" function for stem cell research. *Dev. Growth Differ.* 52, 131-144. doi:10.1111/j.1440-169X.2009.01157.x

<sup>5</sup> Molinaro, A. M. and Pearson, B. J. (2016). In silico lineage tracing through single cell transcriptomics identifies a neural stem cell population in planarians. *Genome Biol.* 17, 87. doi:10.1186/s13059-016-0937-9

ластов. Более того, последние результаты показали, что операционально определенные плюрипотентные с-необласты - связующее звено всех клеточных линий планарии - входят в подкласс, отмеченный мембранным белком тетраспанин. Следовательно, определение судьбы клеток планарий, вероятно, представляет собой иерархический процесс, который включает первоначальную «дифференцировку» с-необластов в сравнительно небольшое число подклассов ограниченных по происхождению необластов, а конечная судьба клеток уточняется в момент постмитотической дифференцировки предшественников вместе с их миграцией в органы-мишени<sup>12</sup>. Благодаря ученым уже понятен точный потенциал дифференцировки специфических подклассов необластов и степень их активности. Но тогда возникает вопрос, как в нужное время в нужном месте образуются правильные клетки и каким образом направляется дифференцировка необластов через лабиринт древа типов клеток планарии.

Любая травма планарий, даже незначительная, приводит к активизации необластов<sup>3</sup>. Раны, связанные с удалением ткани, привлекают клетки, образовавшиеся в результате их деления (механизм этого явления неизвестен); последующее накопление постмитотического потомства необласта под закрытой раневой поверхностью приводит к образованию бластемы - массы клеток, дифференцирующихся в процессе формирования ткани. Бластема впервые проявляется примерно через 24 ч после ранения в виде тонкого края непигментированной ткани и растет из-за активной локальной пролиферации необластов у ее основания<sup>45</sup>.

---

<sup>1</sup> Eisenhoffer, G. T., Kang, H. and Sánchez Alvarado, A. (2008). Molecular analysis of stem cells and their descendants during cell turnover and regeneration in the planarian *Schmidtea mediterranea*. *Cell Stem Cell* 3, 327-339. doi:10.1016/j.stem.2008.07.002

<sup>2</sup> Lapan, S. W. and Reddien, P. W. (2011). *Dlx* and *Sp6-9* control optic cup regeneration in a prototypic eye. *PLoS Genet.* 7, e1002226. doi:10.1371/journal.pgen.1002226

<sup>3</sup> Wenemoser, D. and Reddien, P. W. (2010). Planarian regeneration involves distinct stem cell responses to wounds and tissue absence. *Dev. Biol.* 344, 979-991. doi:10.1016/j.ydbio.2010.06.017

<sup>4</sup> Baguñà, J. (1976b). Mitosis in the intact and regenerating planarian *Dugesia mediterranea* n.sp. I. *J. Exp. Zool.* 195, 53-64. doi:10.1002/jez.1401950106

<sup>5</sup> Newmark, P. A. and Sánchez Alvarado, A. (2000). Bromodeoxyuridine specifically labels the regenerative stem cells of planarians. *Dev. Biol.* 220, 142-153. doi:10.1006/dbio.2000.9645

Результаты экспериментов позволили ученым сделать вывод, что бластема в значительной степени состоит из постмитотического потомства раневых делений необластов (исследователи предполагают, что трансдифференцировка уже существующих клеток вносит незначительный вклад в регенерацию планарий)<sup>1</sup>. Часто случается, что до завершения регенерации регенерирующие фрагменты не в состоянии принимать пищу, поэтому бластема не может восстановить все утраченные ткани в их первоначальном размере; вероятно, ее задача заключается в восстановлении осевых концов тела (например, «голова», «хвост» или «край тела»), а дальнейшее восстановление соседних структур достигается посредством повторного динамического моделирования имеющих тканей<sup>2</sup>.

**Восстановление общего плана тела планарии.** Необласты, расположенные в хвосте или в бластеме хвоста, не участвуют в восстановлении глаз<sup>3</sup>, даже несмотря на то, что они в такой же степени обладают свойством плюрипотентности, как и расположенные в других фрагментах тела животного. Это говорит о существовании процессов формирования паттернов, которые определяют выбор судьбы клетки в зависимости от местоположения, аналогично информации о локализации клетки во время развития. Действительно, экспериментальное возмущение консервативных сигнальных путей приводит к драматическим преобразованиям плана тела. Например, ингибирование канонической передачи сигналов Wnt вызывает появление глаз в хвосте путем преобразования существующего хвоста в голову или путем перепрограммирования хвостовых бластем в развитие головы у регенерирующих животных<sup>4</sup> (рис. 1.5А, верхний ряд).

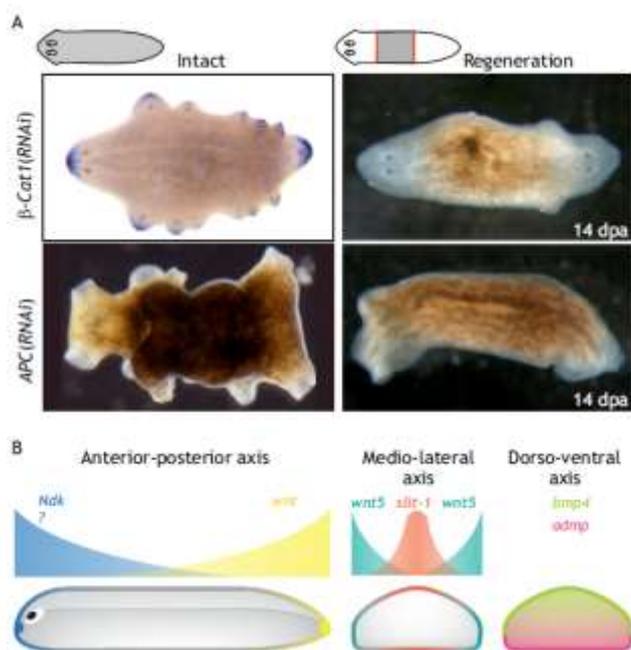
---

<sup>1</sup> Baganà, J. (2012). The planarian neoblast: the rambling history of its origin and some current black boxes. *Int. J. Dev. Biol.* 56, 19-37. doi:10.1387/ijdb.113463jb

<sup>2</sup> Agata, K., Saito, Y. and Nakajima, E. (2007). Unifying principles of regeneration I: epimorphosis versus morphallaxis. *Dev. Growth Differ.* 49, 73-78. doi:10.1111/j. 1440-169X.2007.00919.x

<sup>3</sup> LoCascio, S. A., Lapan, S. W. and Reddien, P. W. (2017). Eye absence does not regulate planarian stem cells during eye regeneration. *Dev. Cell* 40, 381-391.e3. doi:10.1016/j.devcel.2017.02.002

<sup>4</sup> Petersen, C. P. and Reddien, P. W. (2008). Smed-betacatenin-1 is required for anteroposterior blastema polarity in planarian regeneration. *Science* 319, 327-330. doi:10.1126/science.1149943



**Рис. 1.5 Планарные системы формирования паттернов.**

А - морфологические последствия экспериментального возмущения передачи сигналов Wnt у интактных червей (слева) или у регенерирующих частей тела (справа). Ингибирование канонической передачи сигналов Wnt через Smed- $\beta$ -catenin-1 (RNAi) стимулирует формирование головы, вызывая либо конверсию хвоста в голову, либо появление множественных внematочных головок (отмеченных Smed-sfrp-1 посредством гибридизации *in situ*) у интактных животных или образование двухголовых структур в регенерирующих частях туловища. Активация передачи сигналов Wnt с помощью Smed-APC (RNAi) стимулирует формирование хвоста, вызывая либо потерю всех передних структур, либо образование двойного хвоста во время регенерации фрагмента тела. В - схема, изображающая известные в настоящее время первичные сигналы формирования паттернов и их размещение вдоль основных осей тела.

В результате активации передачи сигналов Wnt развивается животное, имеющее противоположный фенотип, утратившее голову и всех передних структур и превратившееся в хвост, или у регенерирующих животных происходит перепрограммирование головных бластем в хвосты<sup>12</sup> (рис. 1.5А, нижний уровень). Вмешательство в сигнальный путь BMP имеет сходные негативные последствия,

<sup>1</sup> Gurley, K. A., Rink, J. C. and Sánchez Alvarado, A. (2008).  $\beta$ -catenin defines head versus tail identity during planarian regeneration and homeostasis. *Science* 319, 323-327. doi:10.1126/science.1150029

<sup>2</sup> Iglesias, M., Almuedo-Castillo, M., Aboobaker, A. A. and Saló, E. (2011). Early planarian brain regeneration is independent of blastema polarity mediated by the Wnt/ $\beta$ -catenin pathway. *Dev. Biol.* 358, 68-78. doi:10.1016/j.ydbio.2011.07.013

стимулируя вентрализацию животных и дублирование всей вентральной нервной системы<sup>123</sup>. В совокупности эти фенотипы идентифицируют передачу сигналов BMP и каноническую передачу сигналов Wnt как детерминанты идентичности соответственно дорсальной или задней ткани.

Практически все вышеупомянутые сигналы осуществляются в многослойной мышечной стенке тела, расположенной под планарным эпителием<sup>4</sup> (рис. 1.2). Важно отметить, что существующие мышечные волокна могут быстро и динамически изменять комплемент образующих их молекул; например, замена хвоста генами градиента головы в случае регенерации хвостового фрагмента<sup>5</sup>. Еще одной важной темой, которая изучается в настоящее время, является функциональная специализация подтипов мышечных волокон в отношении сигналов формирования паттернов, которые они выражают<sup>6</sup>. Группа клеток на кончике головы и хвоста - так называемые полюсные клетки - принимают активное участие в определении судьбы головы и хвоста и, вероятно, иницируют градиенты экспрессии сигналов хвоста и головы в мускулатуре тела<sup>789</sup>. Кроме того, недавнее

---

<sup>1</sup> Gaviño, M. A. and Reddien, P. W. (2011). A Bmp/Admp regulatory circuit controls maintenance and regeneration of dorsal-ventral polarity in planarians. *Curr. Biol.* 21, 294-299.

doi:10.1016/j.cub.2011.01.017

<sup>2</sup> Molina, M. D., Neto, A., Maeso, I., Gómez-Skarmeta, J. L., Saló, E. and Cebrià, F. (2011). Noggin and noggin-like genes control dorsoventral axis regeneration in planarians. *Curr. Biol.* 21, 300-305. doi:10.1016/j.cub.2011.01.016

<sup>3</sup> Reddien, P.W., Bermange, A. L., Kicza, A. M. and Sánchez Alvarado, A. (2007). BMP signaling regulates the dorsal planarian midline and is needed for asymmetric regeneration. *Development* 134, 4043-4051. doi:10.1242/dev. 007138

<sup>4</sup> Scimone, M. L., Cote, L. E. and Reddien, P. W. (2017). Orthogonal muscle fibres have different instructive roles in planarian regeneration. *Nature* 551, 623-628. doi:10.1038/nature24660

<sup>5</sup> Witchley, J. N., Mayer, M., Wagner, D. E., Owen, J. H. and Reddien, P.W. (2013). Muscle cells provide instructions for planarian regeneration. *Cell Rep.* 4, 633-641.

doi:10.1016/j.celrep.2013.07.022

<sup>6</sup> Scimone, M. L., Cote, L. E. and Reddien, P. W. (2017). Orthogonal muscle fibres have different instructive roles in planarian regeneration. *Nature* 551, 623-628. doi:10.1038/nature24660

<sup>7</sup> Blassberg, R. A., Felix, D. A., Tejada Romero, B. and Aboobaker, A. A. (2013). PBX/extradenticle is required to re-establish axial structures and polarity during planarian regeneration. *Development* 140, 730-739. doi:10.1242/dev.082982

<sup>8</sup> Chen, C.-C. G., Wang, I. E. and Reddien, P.W. (2013). PBX is required for pole and eye regeneration in planarians. *Development* 140, 719-729. doi:10.1242/dev. 083741

<sup>9</sup> Oderberg, I. M., Li, D. J., Scimone, M. L., Gaviño, M. A. and Reddien, P. W. (2017). Landmarks in existing tissue at wounds are utilized to generate pattern in regenerating tissue. *Curr. Biol.* 27, 733-742. doi:10.1016/j.cub.2017.01.024

открытие того, что определенные слои мускулатуры стенки тела выражают специфические для оси сигналы, интригует в свете стереотипного расположения волокон вдоль осей А-Р и М-Л. Хотя фактическое распределение в тканях экспрессируемых в мышцах лигандов BMP и Wnt еще не определено, их влияние на анатомию планарий и выбор судьбы клеток убедительно свидетельствует о том, что, по крайней мере, некоторые из них могут проникать в мезенхиму, содержащую необласты<sup>1</sup>. Следовательно, начинает формироваться концептуальная основа, в соответствии с которой паттерны экспрессии паттерновых сигналов в мускулатуре стенки тела транслируются в специфические для местоположения сигнальные среды в мезенхиме, которые в конечном итоге опосредуют локализованные судьбы выбора потомства необластов<sup>23</sup>.

Механизмы и принципы, с помощью которых сигналы паттернов влияют на выбор судьбы необластов, в настоящее время находятся в центре внимания в этой области. Хотя лежащие в их основе генные регуляторные цепи и сети еще предстоит выяснить, преобразование градиента передачи сигналов Wnt в градиенты экспрессии транскрипционных факторов в стволовых клетках является рабочей гипотезой, возможно, объясняющей ключевой аспект позиционной информации у планарий.

**Восстановление осевой структуры тела планарий.** Учитывая важность сигнальных градиентов для поддержания анатомии планарий, восстановление сигнальных паттернов становится ключевой предпосылкой успеха регенерации фрагментов ткани. Интересным наблюдением в этом отношении является тот факт, что из фрагмента ткани любого типа всегда регенерируются голова и хвост вдоль ориентации исходных осей тела (рис. 3А). Это свидетельствует о том, что ткани планарии обладают внутренней полярностью, указывающей направление

---

<sup>1</sup> Scimone, M. L., Cote, L. E. and Reddien, P. W. (2017). Orthogonal muscle fibres have different instructive roles in planarian regeneration. *Nature* 551, 623-628. doi:10.1038/nature24660

<sup>2</sup> Reddien, P.W. (2018). The cellular and molecular basis for planarian regeneration. *Cell* 175, 327-345. doi:10.1016/j.cell.2018.09.021

<sup>3</sup> Rink, J. C. (2018). Stem cells, patterning and regeneration in planarians: selforganization at the organismal scale. *Methods Mol. Biol.* 1774, 57-172. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_2

регенерации. Как установлено, ключевым эффектором полярности является ингибитор Wnt notum<sup>1</sup>. Однако поскольку необласти необходимы для регенерации полюса, они играют важную роль в реализации паттерна. Полюсные клетки формируются в непосредственной близости от раны и собираются к 3-му дню после ампутации в кончик бластемы<sup>2</sup>

Как показал анализ литературы<sup>3</sup>, в ходе экспериментов выяснены эффекты и механизмы воздействия физических и химических факторов на регенеративные процессы планарий. Так, показан стимулирующий эффект слабых магнитных полей в зависимости от биологического фактора (физиологического состояния организма - фазы регенеративного процесса), разнонаправленные эффекты от воздействия эндогенных пептидов, нейротрансмиттеров<sup>4</sup> и нейромедиаторов.

Таким образом, планарии представляют собой уникальную модель для изучения регенерации и активности стволовых клеток в различных химических и физических условиях. Исследовательская работа с использованием этого модельного животного могут дать ответы на многие актуальные вопросы об особенностях жизнедеятельности необластов, об эволюционной обусловленности способности животных к регенерации и др.

---

<sup>1</sup> Petersen, C. P. and Reddien, P. W. (2011). Polarized notum activation at wounds inhibits Wnt function to promote planarian head regeneration. *Science* 332, 852-855. doi:10.1126/science.1202143

<sup>2</sup> Gurley, K. A., Elliott, S. A., Simakov, O., Schmidt, H. A., Holstein, T. W. and Sánchez Alvarado, A. (2010). Expression of secreted Wnt pathway components reveals unexpected complexity of the planarian amputation response. *Dev. Biol.* 347, 24-39. doi:10.1016/j.ydbio.2010.08.007

<sup>3</sup> Тирас Х.П. Регуляция стволовых клеток планарий физическими и химическими факторами / Х.П. Тирас // В сборнике: труды международной научной конференции СРТ2015 Международная научная конференция Московского физико-технического Института (государственного университета) Института физико-технической информатики. Институт физико-технической информатики. - 2016. - с. 14-39.

<sup>4</sup> Нейротрансмиттеры как универсальные регуляторы онтогенеза: рецепция и механизмы сопряжения со вторичными мессенджерами / Г.А. Бузников [и др.] // Информационный бюллетень РФФИ. Биология, Медицинская наука - 1996 - 4

## 1.2. Объекты и методы исследования

### 1.2.1 Регистрация хемилюминесценции как метод исследования

Все химические реакции, протекающие в клетке, сопровождаются выделением энергии, тепловой или световой. Впервые свечение биологических тканей открыл А. Г. Гурвич<sup>1</sup> (1923 г.) и назвал его митогенетическим излучением. Ему удалось обнаружить свечение проростков растений, а также клеток и тканей животных, измельченных кусочков тканей и изолированных митохондрий. Через 50 лет Роберт Эллан (1973 г.) экспериментально обнаружил сверхслабое свечение стимулированных бактериями лейкоцитов крови человека<sup>2</sup> (рис. 1.6).

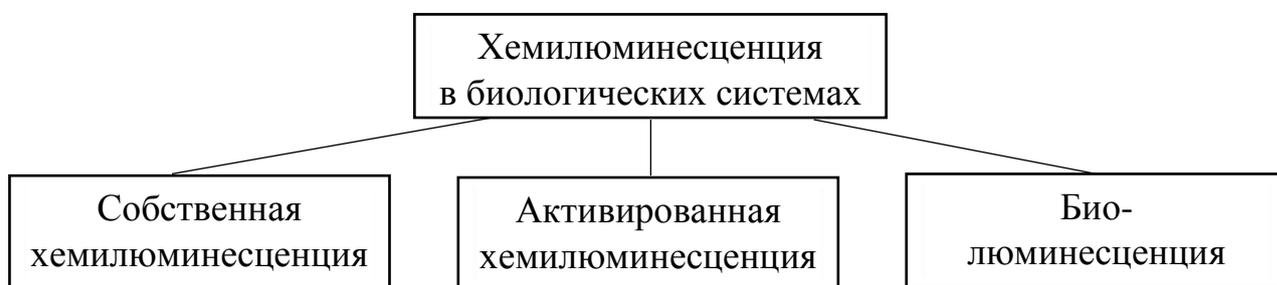


Рисунок 1.6 Виды хемилюминесценции

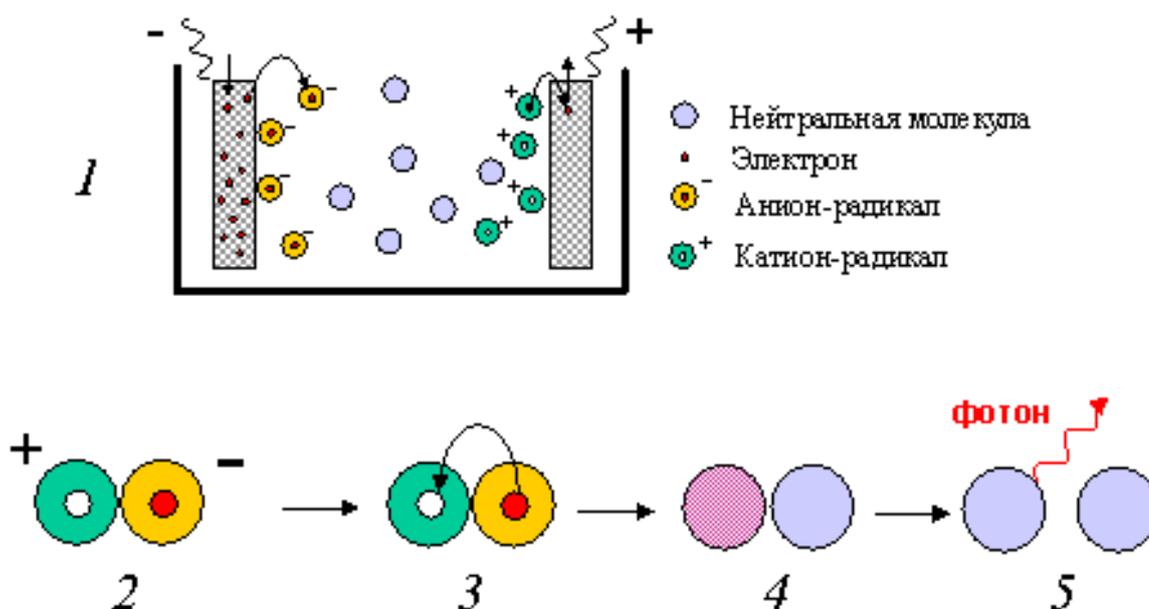
**Биолюминесценция.** Среди бактерий, грибов, животных часто встречаются виды, способные излучать свет, видимый невооруженным глазом. Такой вид люминесценции называют биолюминесценцией. Это красивое явление также имеет химическую природу: субстратом химической реакции является органическое вещество люциферин, который окисляется под действием специфического фермента люциферазы. В роли окислителя выступает чаще всего молекулярный кислород, иногда перекись водорода, и эти реакции протекают с образованием промежуточных комплексов - органических перекисных соединений. При их распаде высвобождается энергия, которая не рассеивается в виде тепла,

<sup>1</sup> Гурвич А.А. Проблема митогенетического излучения как аспект молекулярной биологии / А.Г. Гурвич // Ленинград. - Медицина. - 1968.

<sup>2</sup> Stjernholm, R.L., Allen, R.C., Steele, R.H., Waring, W.W., Harris, J.A. (1973) *Infect. Immun.*, 7, 313-4.

а возбуждает молекулы вещества, испускающего фотоны (отсюда название «холодное свечение»). От их энергии, а значит от типа конкретного люциферина, зависит частота света (т.е. цвет). Как отмечают исследователи, люциферины и люциферазы у различных биологических видов химически не идентичны: в природе встречается около тридцати различных биолюминесцентных систем, из которых лишь семь люциферингов сегодня изучены.

**Молекулярный механизм хемилюминесценции.** Свечение, сопровождающее химические реакции, называется хемилюминесценцией. Многие химические реакции сопровождаются превращением энергии химической реакции в свет (свечением), как правило, с участием свободных радикалов.

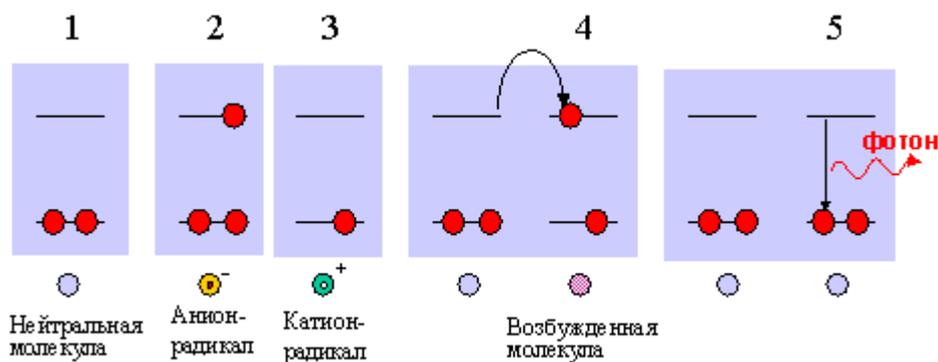


**Рис. 1.7 Хемилюминесценция при рекомбинации катион - и анион-радикалов полициклических углеводородов.**

1 - Между электродами, опущенными в раствор органического электролита, прикладывают разность потенциалов. С катода электроны захватываются молекулами и образуются анион-радикалы. На аноде электроны отрываются от молекул и образуются катион-радикалы. 2 - 5 - При взаимодействии катион-радикала и анион-радикала в результате их столкновения (2) электрон переходит с катион-радикала на анион-радикал (3). Однако при этом есть вероятность того, что он окажется не на самом нижнем электронном уровне, а на более высоком. Образуется возбужденная молекула углеводорода (красный кружок на схеме 4). При переходе электрона на более низкий уровень происходит высвечивание кванта света (5).

Механизм выделения световой энергии можно продемонстрировать на примере взаимодействия органических радикалов, получаемых электрохимическим путем (полициклические углеводороды). В раствор люминесцирующего органического вещества в органическом электролите опускали пару электродов. С катода (-) на молекулы люминесцирующего вещества переходят электроны и образуются анион-радикалы (заряженные отрицательно). На аноде (+) электроны отнимаются от молекул и образуются катион-радикалы (заряженные положительно, см. рис. 1.7., вверху).

При перемешивании раствора катион-радикалы будут взаимодействовать с анион-радикалами (рис. 1.7, внизу); при этом образуется две молекулы исходного углеводорода, одна из которых может оказаться в электронно-возбужденном состоянии и переходит в основное состояние с испусканием кванта света (фотона).



**Рис. 8. Схема электронных энергетических уровней участников реакции взаимодействия катион-радикала и анион-радикала одного и того же вещества:**

1 - исходная молекула; 2 - анион-радикал; 3 - катион-радикал; 4 - перенос электрона с анион-радикала на катион-радикал; 5 - перенос электрона в электронно-возбужденной молекуле продукта реакции, который сопровождается высвечиванием кванта света хемилюминесценции.

На рис. 1.8 показаны верхние электронные энергетические уровни в реагирующих радикалах и продуктах их взаимодействия. В молекулах на верхнем заполненном электронном уровне электроны расположены попарно. У катион-радикала на верхнем уровне остается только один, неспаренный электрон. У анион-

радикала появляется неспаренный электрон на следующем (расположенном выше) энергетическом уровне. При взаимодействии радикалов (имеющих противоположный заряд и потому притягивающихся друг к другу) произойти перенос электрона может произойти таким образом, что два электрона окажутся на разных уровнях. Последнее означает, что один из ее внешних электронов оказывается не на самом нижнем свободном электронном уровне, как у исходных молекул, а на вышележащем электронном уровне. Такая молекула при переходе в основное состояние испускает квант света.

Хотя большинство из химических реакций, сопровождающихся свечением, представляют собой сложные процессы, протекающие через многие промежуточные стадии, но в целом основные этапы запасания и высвечивания энергии можно разделить на три этапа:

Первый этап - восстановление одного из веществ - компонентов реакции (присоединение электрона) и окисление другого (отрыв электрона), что приводит к запасанию химической энергии, которая позднее выделится в виде фотона.

Второй этап - окислительно-восстановительная реакция: перенос электрона не на самый нижний, а на один из более высоких энергетических уровней; так образуется продукт реакции в электронно-возбужденном состоянии.

Третий этап - люминесценция: высвечивание фотона при переходе молекулы из электронно-возбужденного в основное состояние.

Молекула не может долго находиться в электронно-возбужденном состоянии и переходит в основное состояние с испусканием кванта света. Испускание света молекулой (люминесценция) происходит за время более длительное, чем время поглощения света молекулой ( $10^{-15}$  с). За это время с молекулой может произойти ряд изменений, определяющих изменения спектров испускания (люминесценции) по сравнению со спектрами поглощения.

**Активированная хемилюминесценция.** Собственную хемилюминесценцию еще называют сверхслабым свечением («сверхслабой фотонной эмиссией»), поскольку она обычно характеризуется очень низкой интенсивностью. В связи с

этим широко распространено измерение хемилюминесценции в аналитических целях в присутствии активаторов хемилюминесценции.

Интенсивность свечения в большой степени зависит от того, какая часть возбужденных молекул продукта перейдет в основное, невозбужденное состояние с испусканием фотона, т.е. от квантового выхода люминесценции продукта реакции. Обычно квантовый выход исчисляется десятые или сотыми долями процента. Но если все молекулы продукта передадут энергию электронного возбуждения на молекулы активатора, тогда интенсивность свечения будет определяться уже квантовым выходом люминесценции активатора, который в идеале приближается к единице.

По механизму действия активаторы делятся на химические и физические активаторы. Химические активаторы хемилюминесценции – это соединения, вступающие в реакции с активными формами кислорода или органическими свободными радикалами, в результате чего образуются молекулы веществ в возбужденном электронном состоянии. Наблюдаемое при этом свечение связано с переходом молекул в основное состояние, что приводит к высвечиванию фотонов:



Среди химических активаторов хемилюминесценции наиболее известен люминол (3-аминофталевый гидразид) (рис. 1.9) и люцигенин [Бис(N-метилакридиний)].

Под действием окислителя, в нашем случае – радикала гидроксила, происходит образование радикала люминола, который затем вступает в реакцию с супероксидным радикалом, образуя внутреннюю перекись (диоксид). Ее разложение приводит к образованию возбужденной молекулы 3-аминофталаата. Переход этой молекулы в основное состояние сопровождается испусканием кванта света.

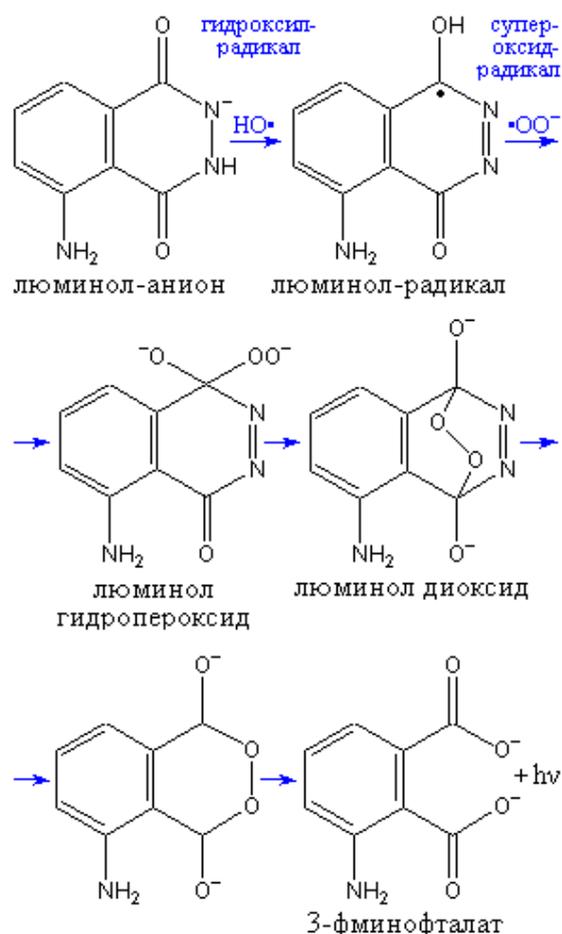


Рис. 1.9 Химические превращения люминола под действием активных форм кислорода – радикалов гидроксила и супероксида (упрощенная схема)

Физические активаторы многократно усиливают интенсивность хемилюминесценции, не влияя на ход химические реакции и не вступая в них. В основе их действия лежит физический процесс переноса (миграции) энергии с молекулы продукта хемилюминесцентной реакции на активатор:

Неактивированная хемилюминесценция:



Активированная хемилюминесценция:



К физическим активаторам можно отнести некоторые люминесцирующие соединения, усиливающие ХЛ при цепном окислении липидов: так, способностью многократно усиливать интенсивность такой хемилюминесценции обладают некоторые красители и комплексы редкоземельных элементов (например,

комплекс редкоземельного иона европия ( $\text{Eu}^{3+}$ ) с антибиотиком хлортетрациклином усиливает хемилюминесценцию при окислении липидов почти в 1000 раз; краситель - производное кумарина С-525 (рис. 1.10), усиливает хемилюминесценцию, сопровождающую цепное окисление липидов, более чем в 1500 раз, никак не влияя при этом на ХЛ при взаимодействии радикалов кислорода (гидроксила и супероксида).

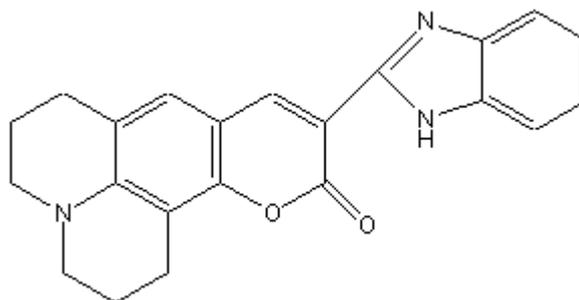


Рис. 1.10 Кумарин С-525

В меньшей степени активизируют свечение и такие красители, как родамин Ж6, нильский красный и нильский синий, а также некоторые порфирины. Все эти активаторы не оказывают влияния на ход реакций перекисного окисления, но заметно увеличивают интенсивность свечения.

Хемилюминесцентный анализ традиционно используется для исследования функциональной активности фагоцитирующих клеток. Активные формы кислорода (АФК) в клетках образуются в процессе нормального аэробного клеточного метаболизма и в результате воздействий на организм факторов окружающей среды, например, ионизирующие и УФ-излучения, ксенобиотики и др. АФК играют двоякую роль в клетках, тканях и органах: с одной стороны, они участвуют во многих патологических процессах, таких как нейродегенеративные изменения, сердечно-сосудистые нарушения и онкологические заболевания; с другой стороны, АФК необходимы для нормальной жизнедеятельности клетки; в частности, они принимают непосредственное участие в процессах регенерации. При этом определенные клетки дифференцируются или дедифференцируются, либо вступают в митотический цикл, либо входят в апоптоз и самоустраниваются. Показано, что у различных животных, от дрозофилы до гидры, планарий, данио рерио и даже мышей, механизмы регенерации во многом сходны. У всех

перечисленных животных механическая травма сопровождается некрозом и/или апоптозом поврежденных клеток, фагоцитозом, пролиферацией, первичной специализацией и/или миграцией плюрипотентных стволовых клеток. Поврежденные клетки высвобождают АФК, которые вызывают у эффекторных клеток активацию MAPK- и/или JNK-путей внутриклеточной сигнализации<sup>1</sup>

В настоящее время активно проводятся исследования хемилюминесценции, позволяющие понять природу ССФЭ, на разных объектах живой природы<sup>2</sup>. Например, внимание ученых привлекает сверхслабое свечение грибов<sup>3</sup>, растений<sup>4</sup>, животных<sup>5</sup>.

Также изучаются особенности хемилюминесценции плазмы<sup>6</sup> и крови<sup>7</sup> человека при обычных условиях, при различных воздействиях (как физических<sup>8</sup>, так и химических<sup>9</sup>). Кроме того, рассматривается динамика и механизм сверхслабой фотонной эмиссии биологических жидкостей человека при патологических

---

<sup>1</sup> Собственная хемилюминесценция необластов планарии в процессе регенерации / Х.П. Тирас [и др.] // Биофизика. - 2015. - Т. 60. - № 5. - С. 975-980.

<sup>2</sup> Хабибуллин Р.Р. Теоретические и практические аспекты процесса люминол-зависимой хемилюминесценции в живых организмах / Р.Р. Хабибуллин, А.В. Федосов // Башкирский химический журнал. - 2006. - Т. 13. - № 2. - С. 106-107.

<sup>3</sup> Дао Ти Ван. Хемилюминесценция культивируемых грибов Вьетнама / Дао Ти Ван, Н.С. Мануковский, И.И. Гительзон // Доклады Академии наук. - 2013. - т. 448. - № 3. - с. 349.

<sup>4</sup> Ершова А.Н. Сукцинатдегидрогеназа и свободнорадикальные процессы в митохондриях растений кукурузы при действии гипоксии и CO<sub>2</sub>-среды / А.Н. Ершова, О.С. Бердникова, Л.В. Чеботова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. - 2018. - № 3. - С. 186-192.

<sup>5</sup> Активированная люцигенином хемилюминесценция тканей животных / Н.С. Матвеева [и др.] // Биофизика. - 2007. - Т. 52. - № 6. - С. 1120-1127.

<sup>6</sup> Изменения в кинетике хемилюминесценции плазмы как мера системного окислительного стресса в организме человека / М.М. Созарукова [и др.] // Биофизика. - 2016. - Т. 61. - № 2. - С. 337-344.

<sup>7</sup> Лесовская М.И. Хемилюминесцентная активность крови у практически здоровых людей // Национальная Ассоциация Ученых. - 2015. - № 2-9 (7). - С. 98-100.

<sup>8</sup> Новиков В.В. Действие слабых магнитных полей на хемилюминесценцию крови человека / В.В. Новиков, Е.В. Яблокова, Е.Е. Фесенко // Биофизика. 2016. Т. 61. № 1. С. 126-130.

<sup>9</sup> Влияние ингибиторов NO-синтазы, содержащих тиоамидиновый фрагмент, на люминолзависимую хемилюминесценцию нейтрофилов человека / С.Я. Проскураков. [и др.] // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. - 2006. - № 2. - С. 31-33.

состояниях, в том числе отравлениях<sup>1</sup>, различных заболеваниях<sup>2</sup>, в различных режимах жизнедеятельности<sup>3</sup>.

Интересен взгляд на сверхслабое свечение крови человека как на показатель состояния иммунокомпетентных клеток в диагностической медицине<sup>4</sup>, а также на как на метод получения информации об организме для назначения соответствующего индивидуального лечения<sup>5</sup>. Также методом регистрации сверхслабой фотонной эмиссии исследователи определяют антиоксидантные свойства продуктов питания<sup>6</sup>, терапевтическую ценность лекарственных растений и биодобавок<sup>7</sup>.

Исследована динамика люминесценции, индуцированной активными формами кислорода, и у планарий в процессе регенерации. Установлено, что регенерация сопровождается изменениями концентрации активных форм кислорода, коррелирующими с энергозатратными процессами, такими как окислительный стресс, вызванный повреждениями клеточных мембран при рассечении планарии, фагоцитоз погибающих клеток и митоз необластов. Впервые показана возможность регистрации физиологического состояния плюрипотентных стволовых клеток на уровне организма *in vivo*.

---

<sup>1</sup> Жукова О.Ю. Влияние острой алкогольной интоксикации на хемилюминесценцию митохондрий печени при экспериментальном сахарном диабете / О.Ю. Жукова, В.Е. Высокогорский / Успехи современного естествознания. // 2005. - № 10. - С. 54-55.

<sup>2</sup> Луценко М.Т. Хемилюминесценция и гистохимия лейкоцитов периферической крови больных бронхиальной астмой / М.Т. Луценко, И.А. Плюсина // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. - 2000. - № 7. - С. 49-54.

<sup>3</sup> Кантюков С.А. Свободнорадикальное окисление в цельной крови при физических нагрузках различной длительности и интенсивности / С.А. Кантюков, Е.Н. Ермолаева, Л.В. Кривохижина // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 6. С. 68.

<sup>4</sup> Ощепков В.Г. Хемилюминесценция иммунокомпетентных клеток крови и ее использование для диагностики туберкулеза / В.Г. Ощепков, Г.М. Дюсенова // Омский научный вестник. - 2007. - № S3-2 (61). - С. 339-340.

<sup>5</sup> Метод хемилюминесценции в индивидуальном подборе иммунокорректоров у больных папилломатозом гортани / Х.Ш. Давудов [и др.] // Российская оториноларингология. - 2008. - № 6 (37). - С. 26-30.

<sup>6</sup> Мамцев А.Н. Хемилюминесценция - способ оценки антиоксидантных свойств йодобогащенных продуктов // Молочная промышленность. - 2005. - № 5. - С. 76.

<sup>7</sup> Изучение антиоксидантной активности некоторых лекарственных растений Забайкалья методом хемилюминесценции / П.Б. Цыдендамбаев [и др.] // Дальневосточный медицинский журнал. - 2006. - № 3. - С. 83-85.

Известно, что главным источником всех радикалов в нормально функционирующих клетках служит реакция одноэлектронного восстановления молекулярного кислорода, приводящая к образованию супероксиданион-радикала. Супероксиданион-радикал образуется НАДФН-оксидантным комплексом клеточных мембран: цитоплазматической мембраны, мембраны эндоплазматического ретикулума и внутренней мембраны митохондрий. Во всех случаях активация НАДФН-оксидантного комплекса связана с функциональной нагрузкой и деполяризацией соответствующих мембран, что особенно сильно проявляется при развитии окислительного стресса. Вторым источником свободных радикалов в живых клетках является монооксид азота NO, образуемый разными NO-синтетазами. В норме в организме по разным оценкам от 2 до 30% потребляемого кислорода преобразуется в АФК. Повышение функциональной нагрузки, в частности двигательной активности, приводит к резкому росту генерации АФК<sup>1</sup>.

При операции в организме планарии повреждаются мембраны клеток, в результате в межклеточной среде повышается концентрация ионов калия и происходит деполяризация неповрежденных мышечных клеток, что в течение нескольких минут приводит к сокращению мышц и закрытию раны. При этом щелевые межклеточные контакты открыты, поэтому деполяризация распространяется на расстояние до 0,5 мм. Если учесть, что при любой поперечной операции происходит перерезка продольных нервных стволов планарии, можно ожидать, что волна деполяризации распространяется по всему телу планарии. В результате изменяется ионный состав интактных клеток: растет активность внутриклеточных ионов натрия и кальция, а также уменьшается концентрация внутриклеточного калия. В результате развития окислительного стресса происходит специфическая активация гена JNK стресс-активируемой протеинкиназы (SAPK), которая относится к большому семейству из митоген-

---

<sup>1</sup> Прижизненные методы контроля фаго- и пиноцитоза на модели пищеварения планарий / Х. П. Тирас [и др.] // Сборник трудов Международной научной конференции «Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности» (SCVRT2018): материалы конф. - М., Протвино, Институт физико-технической информатики, 2018. - с. 347-359.

активированных протеинкиназ (MAPKs). Эта JNK-киназа модулирует экспрессию генов, связанных с травмой, в частности, индуцирует развитие апоптической гибели клеток. Отметим, что развитие окислительного стресса происходит одинаковыми путями вне зависимости от вызвавшей его причины. В результате повышения концентрации ионов кальция внутри клетки активизируется экзоцитоз и образование отростков; в результате окислительного стресса повышается подвижность клеток. При этом необласты начинают двигаться к поврежденным клеткам. В течение 1–3 ч после операции фрагменты погибших клеток поглощаются близлежащими фагоцитирующими необластами. Установлено, что фагоцитозная активность клеток сопровождается сильным увеличением неселективной проводимости плазматической мембраны, в том числе для ионов калия и водорода, приводящей к полной деполяризации. Деполяризация, в свою очередь, активизирует активный ионный транспорт, что приводит к резкому росту генерации АФК, среди которых супероксиданион радикал, гидроксильный анион, синглетный кислород, перекись водорода, гипохлорид. Таким образом, фагоцитоз сопровождается генерацией кислородных радикалов в фагоцитирующих клетках, что вызывает усиление хемилюминесценции.

Фагоцитоз у планарий является базовым процессом не только при регенерации, но и при питании. После поглощения пищи стенки кишечника планарии распадаются, и содержимое кишечника попадает в паренхиму, после чего все клетки (кроме нервных) паренхимы фагоцитируют пищу, а затем происходит восстановление исходной структуры тела. Установлено экспериментально, что процесс фагоцитоза, связанный с перевариванием пищи у планарий, сопровождается интенсивной хемилюминесценцией, развивающейся в течение суток и продолжающейся до пяти дней. При этом фагоцитарная активность необластов и митоз стимулируют генерацию АФК<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Прижизненные методы контроля фаго- и пиноцитоза на модели пищеварения планарий / Х. П. Тирас [и др.] // Сборник трудов Международной научной конференции «Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности» (SCVRT2018): материалы конф. - М., Протвино, Институт физико-технической информатики, 2018. - с. 347-359.

## 1.2.2 Цветометрия и микроспектофотометрия как методы исследования

Цвет – качественная субъективная характеристика электромагнитного излучения оптического диапазона, определяемая на основании возникающего физиологического зрительного ощущения и зависящая от ряда физических, физиологических и психологических факторов<sup>1</sup>.

Цветометрия – оптический метод анализа, регистрирующий цвет объекта визуально или с помощью приборов в одной из шкал цветности<sup>2</sup>.

С развитием компьютерной техники появилось множество программ, позволяющих получать цифровые характеристики цвета:

- графические редакторы (Photopaint, Adobe Photoshop, и др.);
- компьютерные денситометры (используются как программные приложения к специализированным приборам);
- универсальные математические пакеты, позволяющие анализировать цвет отдельных пикселей цифровых изображений (MatLab, MathCAD);
- программы, позволяющие обрабатывать изображения непосредственно в гаджете «колорпикеры», –(Color Picker, Color Grab, Pipette, RGB и др.).<sup>3</sup>

При программном анализе изображений объекта количественными характеристиками цвета выступают каналы цветовых моделей HSB, RGB, Lab. В модели HSB тон (Hue, H) - собственно цвет, его величина определяется поворотом по цветовому кругу на определённый градус (рис. 11). Насыщенность (Saturation, S) - интенсивность выбранного (хроматического) цвета, то есть отличие от равного ему по яркости (ахроматического) серого цвета, определяется расстоянием в процентах от центра круга: 0% - нейтрально-серый цвет, 100% край круга -

---

<sup>1</sup> Байдала Д.А. Идентификация фарфоровых изделий по виду материала методами спектроколориметрии // Зеленый коридор. - 2017. - № 2. - С. 15-17.

<sup>2</sup> Черноусова О.В. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа / О.В. Черноусова, О.Б. Рудаков // Химия, физика и механика материалов. - 2019. - № 2 (21). - С. 55-125.

<sup>3</sup> там же.

наиболее насыщенный, «чистый цвет». Яркость (Brightness, B) - параметр, определяющий количество света, отраженного от объекта, окрашенного в определённый цвет. Он измеряется в процентном отношении: 0% - минимальное отражение, чёрный цвет; 100% - максимальное отражение - белый цвет.

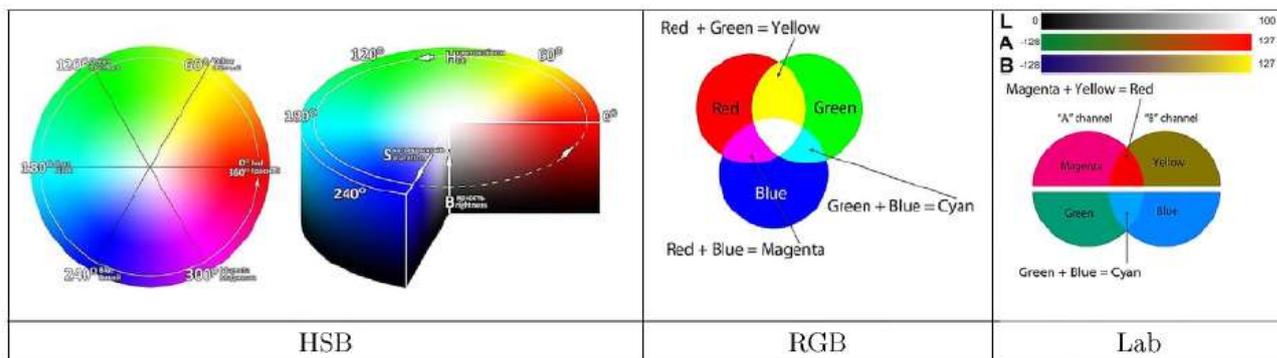


Рис. 1.11 Каналы цветовых моделей

В основе цветовой модели RGB лежат три основных цвета: красный (Red, R), зеленый (Green, G) и синий (Blue, B). Все видимые цвета - результат смешивания этих трёх основных цветов. Например, жёлтый получается при смешивании красного и зелёного, голубой - при смешивании синего и зелёного. При этом интенсивность каждого из трёх основных цветов находится в диапазоне от 0 до 255, всего 256 градаций. Например, чистый красный цвет имеет значение  $R = 255$ ,  $G = 0$ ,  $B = 0$  (RGB (255, 0, 0)), жёлтый цвет - RGB (255, 255, 0).

Lab - трехканальная модель цвета, основанная на человеческом восприятии цвета. Любой цвет в Lab определяется уровнем его светлости (Lightness, L), т.е. близости к белому цвету (чёрный = 0, белый = 100) и двумя хроматическими компонентами: параметром а, который изменяется в диапазоне от зеленого до пурпурного, и параметром b, изменяющимся в диапазоне от синего до желтого (которые изменяются в диапазоне от -127 до +127).

Таким образом, канал (L) модели Lab оказывается идентичным каналу яркости (B) в модели HSB. Соотношение хроматических компонент а и b иллюстрирует непосредственно цвет объекта - ту же характеристику, что и канал H

(модель HSB), и соотношение каналов R, G и B (модель RGB). По сумме величин R, G и B (модель RGB) можно судить о насыщенности (S) анализируемого цвета<sup>1</sup>.

Для оценки и воспроизведения цвета различных объектов было разработано несколько моделей, в том числе цветовое пространство RGB. Основными линейно независимыми цветами в системе были выбраны следующие монохроматические излучения: красный R (D700), зеленый G (D546) и синий B (D436). После серии экспериментов по оценке восприятия цвета человеком Международная комиссия по освещению разработала стандарт CIE 1931 XYZ –цветовое пространство, которое вмещает в себя все воспринимаемые человеком цвета. Предложенная трихроматическая система зрительных пигментов базировалась на возможности получения необходимого цвета или его оттенка любой интенсивности путем смешивания во множестве комбинаций цвета и интенсивности света трех разных длин волн (соответствующих трем основным цветам). С другой стороны, данная система подразумевала, что, если диапазон поглощения трех зрительных пигментов охватывает практически весь видимый участок спектра и максимумы поглощения этих пигментов четко разграничены, свет любого цвета (или с любым распределением длин волн) можно разделить на три первичных компонента, которые будут детектироваться этими тремя пигментами. В качестве основных количественных характеристик цвета были выбраны следующие: цветовой тон (Hue), яркость (Brightness), светлость (Lightness). Цветовой тон (цветность) – основная характеристика цвета, которая определяет его положение в спектре. Яркость – характеристика, которая показывает, насколько сильно излучается световая энергия того или иного цветового тона (красного, желтого, фиолетового и т.п.). Светлость – степень близости цвета (цветового тона) к белому. Несмотря на то, что система RGB преимущественно используется в компьютерной графике и представляет собой набор аппаратных данных

---

<sup>1</sup> Прижизненные методы контроля фаго- и пиноцитоза на модели пищеварения планарий / Х. П. Тирас [и др.] // Сборник трудов Международной научной конференции «Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности» (SCVRT2018): материалы конф. - М., Протвино, Институт физико-технической информатики, 2018. - с. 347-359.

для воспроизведения цвета на бумаге, экране монитора и других электронных устройствах, а основные цвета (XYZ) системы CIE 1931 были получены путем пересчета из цветовых координат RGB, эти системы часто применяются для описания цвета растений, пищевых красителей, вин и т.д. В 1976 году трихроматическая система CIE 1931 XYZ была модифицирована в модель CIELab (CIE  $L^*a^*b^*$  или Lab), которая на сегодняшний день является международным стандартом оценки восприятия цвета. Было создано пространство, изменение цвета в котором более линейно с точки зрения человеческого восприятия (по сравнению с XYZ). Одинаковое изменение значений цветовых координат в разных областях данного пространства приводит к тождественному ощущению изменения цвета. Система CIELab хорошо подходит для представления цветовых различий, поскольку геометрические расстояния в пространстве приближаются к интуитивным цветовым интервалам, и соответствуют значениям, измеренным спектрофотометрически.<sup>1</sup>

**Цветометрия в психологии.** Цвет - многосторонний показатель окружающего мира<sup>2</sup>. Давно замечено воздействие цвета на психику человека и животных. В рамках психофизиологических исследований ученые изучают особенности цветовосприятия различных животных: рыб<sup>3</sup>, амфибий<sup>4</sup>, млекопитающих<sup>5</sup> и человека<sup>6</sup>. Также отдельным направлением научной работы является изучение

---

<sup>1</sup> Аникина Н.С. Методы оценки цвета вин. обзор / Н.С. Аникина, С.Н. Червяк, Н.В. Гниломедова // Аналитика и контроль. 2019. - Т. 23. - № 2. - С. 158-167.

<sup>2</sup> Токарчук Е.Ю. Цвет как многоаспектное явление в жизни человека / Е.Ю. Токарчук, Г.Т. Солтанова // Инженерно-педагогический вестник: легкая промышленность. // 2018. - № 4 - (7). - с. 49-55.

<sup>3</sup> Максимов В.В. Цветовые свойства детекторов направления движения, проецирующихся в тектум карася / В.В. Максимов, Е.М. Максимова, П.В. Максимов // Сенсорные системы. - 2007. - т. 21. - № 1. - с. 19-28.

<sup>4</sup> Двухканальная модель ахроматического зрения лягушки / Ч.А. Измайлов [и др.] // Сенсорные системы. - 2006. - т. 20. - № 1. - с. 21-31.

<sup>5</sup> Полянский В.Б. Школа Е.Н. Соколова и психофизиологические исследования на животных // Вестник Московского Университета. - Серия 14: Психология. - 2010. - № 4. - с. 140-148.

<sup>6</sup> Ципящук Б.А. Восприятие цвета человеком / Бюллетень медицинских интернет-конференций // 2017. - Т. 7. - № 6. - С. 1065.

воздействия цвета на психическое и эмоциональное состояние человека в нормальном<sup>1</sup> и патологическом состоянии<sup>2</sup>, связь между цветовосприятием и полом<sup>3</sup>, возрастом человека<sup>4</sup>, типом личности<sup>5</sup>. Кроме того, в силу влияния на внутренний мир человека цвет является важным фактором для создания среды, комфортной для людей. Этим обусловлена признанная особая роль цвета в дизайне одежды<sup>6</sup>, в ландшафтном дизайне<sup>7</sup>, в дизайне помещений<sup>8</sup> и архитектуре населенных пунктов<sup>9</sup>. Также необходимо отметить важное значение цвета как компонента оформления средств массовой информации<sup>10</sup>.

Цвет является очень точным и информативным показателем для регистрации и контроля состояния самых разнообразных объектов, которыми занимаются многие науки. Поэтому цветометрический метод исследования используется в самых различных научных направлениях.

**Цветометрия в технологии и материаловедении.** Производство качественной продукции в самых разных отраслях экономики во многом зависит от

---

<sup>1</sup> Разживина Г.П. Психофизиологическое воздействие цвета и света на человека / Г.П. Разживина, Е.В. Землянская // Образование и наука в современном мире. Инновации. - 2019. - № 1 (20). - С. 257-261

<sup>2</sup> Шилко Н.С. Особенности использования цветов при изображении своих внутренних образов у людей с психическими расстройствами / Н.С. Шилко, М.А. Омельченко, Е.М. Иванова // Социальные трансформации. - 2019. - № 30. - С. 225-231.

<sup>3</sup> Дудорова Е.В. Взаимосвязи параметров качества жизни и цветовых предпочтений у мужчин и женщин / Е.В. Дудорова, Е.А. Шалагина // Вестник Пермского университета. Философия. Психология. Социология. - 2019. - № 3. - С. 372-378.

<sup>4</sup> Мишенькина Е.В. Возрастные особенности цветопредпочтения и взаимодействие цвета и возраста человека // Ярославский педагогический вестник. - 2005. - № 3 (44). - С. 75-78.

<sup>5</sup> Ахмедханов А.М. Взаимосвязь особенностей восприятия цвета с психофизиологическими характеристиками личности // Вестник научных конференций. - 2015. - № 1-3. - С. 16-17.

<sup>6</sup> Набокина Ю.А. Роль цвета в проектировании одежды и его влияние на ощущения человека // Новая наука: От идеи к результату. - 2017. - Т. 2. - № 2. - С. 164-170.

<sup>7</sup> Ястребова О.Г. Особенности восприятия цвета в ландшафте // Вестник ландшафтной архитектуры. - 2013. - № 2. - С. 103-106.

<sup>8</sup> Психология цвета в дизайне интерьера / Т.Н. Архипова [и др.] // Социально-гуманитарные технологии. - 2019. - № 1 (9). - С. 41-46.

<sup>9</sup> Затяева Е.К. Цвет в архитектурной среде вахтовых посёлков // Architecture and Modern Information Technologies. - 2019. - № 2 (47). - С. 318-331.

<sup>10</sup> Пожарский А.О. Оценка цветового охвата системы печати посредством объема тела охвата цветов, вычисленного с учетом неоднородности цветового пространства / А.О. Пожарский, И.А. Сысуев // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. - 2006. - № 4. - С. 3-12.

использования качественных материалов, физические свойства которых соответствуют установленным стандартам. Поэтому эффективность промышленного производства можно спрогнозировать, изучая цвет используемых материалов. Поэтому, как показал анализ литературы, специалисты-технологи применяют цветометрические методы для определения качества таких материалов, как пластмассы, керамические<sup>1</sup> камнелитые<sup>2</sup>, строительные материалы<sup>3</sup>, полимерных пленок<sup>4</sup>, сырья для ювелирной<sup>5</sup>, текстильной<sup>6</sup> и кожевенной промышленности<sup>7</sup>.

Также методами цветометрии оценивается соблюдение технологии производства<sup>8</sup> и качество готовой продукции: бижутерии и ювелирных изделий<sup>9</sup>, тканей<sup>10</sup>, фарфоровых<sup>11</sup> и керамических изделий<sup>12</sup>.

---

<sup>1</sup> Качественная и количественная оценки цвета керамических материалов / К.А. Арискина [и др.] // Вестник Технологического университета. - 2017. - Т. 20. - № 5. - С. 20-22.

<sup>2</sup> Игнатова А.М. Взаимосвязь структуры и цветности камнелитых материалов, полученных на основе минерального нерудного и техногенного сырья / А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов // Фундаментальные исследования. - 2012. - № 6-2. - С. 435-440.

<sup>3</sup> Платов Ю.Т. Инструментальная спецификация цветовых характеристик строительных материалов / Ю.Т. Платов, Р.А. Платова // Строительные материалы. - 2013. - № 4. - С. 66-72.

<sup>4</sup> Математические модели оценки цветовых характеристик промышленных полимерных пленочных материалов / А.С. Разыграев [и др.] // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. - 2015. - № 3 (73). - С. 32-36.

<sup>5</sup> Галанин С.И. Выбор конструкционных металлов и сплавов для ювелирных изделий на основе анализа их цветовых характеристик / С.И. Галанин, К.Н. Колупаев // Труды Академии технической эстетики и дизайна. 2014. - № 1. - С. 31-35.

<sup>6</sup> Об итогах тестирования хлопкового волокна с применением макета национальной диаграммы цвета / Р.А. Гуляев [и др.] // Механика и технологии. 2014. - № 3 (45). - С. 40-45.

<sup>7</sup> Морфометрические показатели свойств шерсти семейства верблюдовых - уникального текстильного материала/М.В.Горбачева[и др.]//Дизайн и технологии-2016.-№ 54 (96)-С.67-73.

<sup>8</sup> Изменение цвета овечьей шерсти по основным этапам переработки / Э.К. Нармбаева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2016. - № 6 (366). - С. 324-328.

<sup>9</sup> Галанин С.И. Методика оценки колористических характеристик ювелирных изделий и бижутерии / С.И. Галанин, А.С. Ляпина // Труды Академии технической эстетики и дизайна. - 2018. - № 1. - С. 19-23.

<sup>10</sup> Горожанкина Е.О. Знаковая информация цвета в текстильном производстве / Е.О. Горожанкина, Т.В. Козлова // Интеграция науки и производства. - 2013. - № 5. - С. 44-46.

<sup>11</sup> Байдала Д.А. Идентификация фарфоровых изделий по виду материала методами спектроколориметрии // Зеленый коридор. - 2017 - № 2. - С. 15-17.

<sup>12</sup> Езерский В.А. Количественная оценка цвета керамических лицевых изделий // Строительные материалы. - 2015. - № 8. - С. 76-80.

**Цветометрия в химических исследованиях.** Огромное количество химических превращений вещества сопровождается изменением его цвета, поэтому цвет - важный показатель широко используемый в аналитической химии. Например, метод химической цветометрии хорошо себя зарекомендовал в анализе цвета комплекса, образуемого металлом с окрашивающим тест-реагентом для обнаружения и количественного измерения содержания металлов, в изучении изменения окраски кислотно-основных индикаторов в зависимости от рН среды, в определении на немодифицированных и химически модифицированных пенополиуретанах по интенсивности окраски продуктов взаимодействия свободного хлора, нитрит- и нитрат- ионов, фенолов, 1- и 2-нафтолов, ароматических аминов и альдегидов, индолов. Этот метод целесообразно использовать для анализа жидкостей и растворов: анализа растворов красителей, для изучения кислотно-основных равновесий в растворах, а также для анализа цветности воды<sup>1</sup>.

**Цветометрия в фармакологии.** В фармацевтической промышленности цветометрический метод позволяет контролировать качество стоматологических составов в процессе их производства, стабильность состава и покрытия таблеток без использования химического анализа. Предложенные способы могут быть использованы для скринингового контроля качества лекарственных препаратов<sup>2</sup>.

Кроме того, цветовые характеристик позволяют выявить состав лекарственных растений<sup>3</sup>, их состояние и терапевтическую ценность<sup>45</sup>.

---

<sup>1</sup> Черноусова О.В. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа / О.В. Черноусова, О.Б. Рудаков // Химия, физика и механика материалов. - 2019. - № 2 (21). - С. 55-125.

<sup>2</sup> Черноусова О.В. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа / О.В. Черноусова, О.Б. Рудаков // Химия, физика и механика материалов. - 2019. - № 2 (21). - С. 55-125.

<sup>3</sup> Визуальные и цветометрические экспресс-способы суммарного определения дубильных веществ в растительном сырье/С.П. Калинкина [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2016. - № 2 (68). - С. 223-229

<sup>4</sup> Исследование цвета растительных порошков с использованием компьютерной цветометрии / А. Ниemiрич [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2016. - Т. 4. - № 11 (82). - С. 15-20.

<sup>5</sup> Иванкова М.Н. Изучение динамики цветовых параметров порошоканного лекарственного растительного сырья при длительном хранении / М.Н. Иванкова, Г.Н. Бузук // Вестник фармации. - 2013. - № 2 (60) - С. 34-39.

**Цветометрия в пищевой промышленности.** Цвет - важный показатель качества и состава пищевых продуктов. Цветовые характеристики, соответствующие стандарту, являются показателем надлежащего качества овощей, фруктов, зерна, круп и продуктов, из них приготовленных. Чаще всего показатели цвета выявляются в процессе визуальной экспертной оценки органолептических показателей, включающих внешний вид и форму, запах и вкус, цвет и прозрачность<sup>12</sup>.

Проводились исследования с целью визуальной оценки ферментативного побурения готовых к употреблению в пищу минимально обработанных яблок в зависимости от кислородопроницаемости упаковки и состава<sup>3</sup>.

Описан опыт визуальной оценки цвета кофе как показателя его качества и предпочтений потребителя относительно вида и марки напитка<sup>4</sup>. В исследованиях ученых цвет выступает также как показатель качества и микробиологических характеристик грибов шиитакэ<sup>5</sup>, сахара-песка<sup>6</sup>. Также в отношении сухих завтраков цвет является показателем их качества и соответствия стандартам<sup>7</sup>.

---

<sup>1</sup> Цур-Царь Д.А. Оценка качества кетчупа / Цур-Царь Д.А., Хатанов К.Ю. // Молодежь и наука. - 2017. - № 5. - С. 38.

<sup>2</sup> Спирина Т.К. Оценка качества сухофруктов // Молодежь и наука. - 2016 - № 1 - С. 71.

<sup>3</sup> Вавилова О.И. Анализ изменения цвета (потемнения) и активности полифенолоксидазы при холодном хранении в модифицированной газовой среде свеженарезанных, готовых к употреблению яблок сорта Золотое Превосходное. (Испания. Израиль) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. - 2004. - № 4. - С. 1372.

<sup>4</sup> Денисенко Т.Н. Оценка качества кофе / Т.Н. Денисенко, С.В. Гаценко // Научный взгляд в будущее. - 2016. - Т. 2. - № 1. - С. 256-260.

<sup>5</sup> Микробиологические характеристики и цвет минимально обработанных грибов шиитакэ при разной температуре хранения. (Бразилия) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. - 2011. - № 1. - С. 187.

<sup>6</sup> Тихонюк А.В. Повышение стабильности контроля цветности сахара-песка экспресс-методом / А.В. Тихонюк, Л.И. Дадеко, Л.С. Клименко // Сахар. - 2010. - N 10. - С. 48-49.

<sup>7</sup> Паньковский Г.А. Системная оценка качества экструдированных гороховых палочек // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. - 2004.-№ 4. -С. 1401.

В процедуре оценки соответствия меда принятым стандартам качества цвет является одним из важных органолептических показателей<sup>1</sup>, оцениваемых визуально с целью выявления фальсификаций<sup>2</sup>.

Но с целью повышения объективности цветометрических исследований, появляются и аппаратно-компьютерные методы исследования, основанные на цифровом анализе изображений с помощью специального программного обеспечения. Широкое применение для измерения параметров окраски в режиме RGB получили планшетные сканеры, имеющие высокую разрешающую способность и достаточную глубину цвета. Планшетные сканеры находят успешное применение при определении цветности сахарного песка, пищевых красителей и других пищевых продуктов. Так, проведена сравнительная оценка цвета инструментальными методами ряда сортов кетчупа по системе Hunter, основанная на анализе уровня красного цвета<sup>3</sup>.

Оптические характеристики соков и экстрактов из выжимок ягод семейства вересковых - брусники, клюквы, черники и голубики снимали спектрофотометрически в диапазоне длин волн 410-630 нм.<sup>4</sup> Использование спектрофотометра СФ-103 (НПКФ Аквилон, Россия) позволило исследователям определить интенсивность поглощения света в результате экстракции пигментов на соответствующих длинах волн к максимумам поглощения пигментов в данном растворителе – 662 Нм, 644 Нм, 440,5 нм.<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup> ГОСТ 31771-2012 «Мед. Метод определения цветности» // Электронный фонд нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200101103>, дата доступа 15.05.2020.

<sup>2</sup> Ларионова Л.В. Особенности применения инструментальных методов для оценки натуральности пчелиного мёда / Л.В. Ларионова, Д.В. Скурихин, Л.М. Стахеева // Молодежь и наука. - 2017. - № 4-2. - С. 73.

<sup>3</sup> Воробьева Н.Н. Методы оценки цвета кетчупа (Чехия) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. - 2000. - № 3. - С. 962.

<sup>4</sup> Нилова Л.П. Влияние СВЧ-нагрева на оптические характеристики ягодных экстрактов / Л.П. Нилова, Р.А. Икрамов, С.М. Малютенкова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2019. - Т. 81. - № 1 (79). - С. 218-224.

<sup>5</sup> Влияние параметров обработки ревеня и крыжовника на формирование цвета // А. Dubinina [et al] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2017. - Т. 6. - № 11 (90). - С. 66-71.

Спектры пропускания и отражения апельсиновой соковой продукции измеряли на спектроколориметре Color i5, снабженном ксеноновой импульсной лампой, воспроизводящей источник света D65. Прибор оборудован приставкой «Test Tube Holder», обеспечивающей измерение спектра отражения на черном фоне и определение Индекса OJ (Index Orange Juice) или CN (Color Number), регламентирующего качество апельсинового сока согласно данным USD of Agriculture<sup>1</sup>. Для определения степени спелости плодов унаби также применялся метод, включающий компьютерный анализ изображений<sup>2</sup>.

В цветовом режиме RGB изучены численные параметры окраски плодов красного перца (*Capsicum annuum*, Linn.), применяемых для получения пищевого красителя (E160c). Анализ окраски проводили после сканирования образцов на планшетном сканере с применением разработанной программы Colors 1.0<sup>3</sup>.

Создана математическая модель динамики цвета фундука при термообработке<sup>4</sup>, картофеля в процессе обжаривания<sup>5</sup>, предложена математическая модель, описывающая динамику цвета корки хлебобулочного изделия и её температуру в процессе выпечки. Рассмотрена параметрическая идентификация модели на примере выпечки тестовой заготовки и показана адекватность математической модели, неизбежно связанная с цифровым анализом изображений и получении количественных характеристик цвета.

С целью контроля качества и курительных свойств табачного сырья используются как визуальные, так и инструментальные методы. С целью совершенствования и повышения точности визуальных методов контроля разработана

---

<sup>1</sup> Губинская Т.В. Колориметрическая идентификация апельсиновой соковой продукции // Зеленый коридор. - 2017. - № 2. - С. 31-33.

<sup>2</sup> Image segmentation and maturity recognition algorithm based on color features of lingwu long jube / Wang Yutan [at al] // Advance journal of food science and technology. - 2013. -vol.5, n 12. -p. 1623-1631.

<sup>3</sup> Герасимов А.В. Численные характеристики окраски плодов паприки (*CAPSICUM ANNUUM*) в режиме RGB / А.В. Герасимов, Я.С. Бурьгина // Химия растительного сырья. - 2002. - № 2. - С. 75-78.

<sup>4</sup> Modelling of the kinetics of colour change in hazelnutz during air roasting / A.D. Demir [at al] // J. Food Engg. - 2002. - Vol. 55, N 4. - P. 283-292.

<sup>5</sup> Colour changes during deep fat frying / M.K. Krokida [at al] // J. Food Engg. - 2001. - Vol.48, N 3. - P. 219-225.

уникальная, не имеющая аналогов шкала цветов табачного сырья, включающая 45 образцов цветов листьев табака от желтой до темно-зеленой окраски. Эта шкала аттестована во ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева по международной колориметрической системе XYZ цветов. Также создано методическое пособие «Атлас табачного сырья», позволяющее определить сорт табачного сырья по его внешнему виду. Для инструментальной оценки цвета табачного сырья создан и прошел государственные испытания оптический прибор «Фотос-83». В основе работы этого прибора лежит метод оценки цвета листа по величине коэффициента отражения при длине волны 675 нм<sup>1</sup>.

При цветометрическом анализе качества растительных масел измеряют специальный параметр - цветное число, определяемое визуальным сравнением цвета масла с окраской стандартных водных растворов йода (ГОСТ 5477-2015). Также с этой целью используют прибор тинтометр, оснащенный встроенными стандартными цветными стеклами. Цифровые цветометрические измерения цветного числа растительных масел проводят с использованием приложения Color Picker под операционную систему Android<sup>2</sup>.

Исследование цвета молока как показателя его качества проводят с применением планшетного сканера со слайд-адаптером (фирма Epson), для оценки цветности изображений применяли цветовую модель RGB, анализ и обработку изображений осуществляли с помощью программного обеспечения в среде пакета MathCad, позволяющего по выделяемой мышью области получать усреднённые значения цветовых параметров модели (яркости красного R, зелёного G и синего B каналов).<sup>3</sup> Также в оценке качества молока имеют ценность микрофотографии молочных продуктов, так как они несут информацию о распределении

---

<sup>1</sup> Дьячкин И.И. Совершенствование неразрушающих методов контроля качества табачной продукции / И.И. Дьячкин, В.А. Саломатин, З.П. Белякова // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. - 2013. - № 1 (331). - С. 5-9.

<sup>2</sup> Перспективы использования цифровой цветометрии в контроле цветности растительных масел при их рафинации // О.В. Перегончая [и др.] Агропромышленные технологии Центральной России. 2019. - № 4 (14) -С. 29-38.

<sup>3</sup> Кучменко Т.А. Новые инструментальные методы оценки органолептических показателей молока / Т.А. Кучменко, Д.А. Погребная, В.В. Хрипушин // Аналитика и контроль. - 2012. - Т. 16. - № 3. - С. 289-298.

жировых шариков по массовым фракциям. В данной работе предлагается использовать для обработки микрофотографий молока, полученных с помощью цифрового микроскопа, исследователи используют пакет прикладных программ ImageJ для обработки графических файлов, а для расчета статистических характеристик - пакет прикладных программ Statistica<sup>1</sup>.

Интересен способ оценки степени потемнения картофеля после термообработки. Для оценки степени потемнения сортов картофеля, вызванного образованием пигментного комплекса хлорогеновой кислоты и железа, который окисляется при охлаждении, применяют либо аналитическое определение количества хлорогеновой кислоты в сырых клубнях, либо изучают интенсивность серого цвета на поверхности отваренных клубней. В последнем случае используют метод анализа цифровых изображений, основанный на измерении степени потемнения срезов клубней. Изображения срезов получают в стандартизованных условиях с помощью цифровой камеры, а степень потемнения анализируют с помощью программного обеспечения для денситометрии и выражают в уровнях серого в пределах шкалы от 0 (абсолютно черный) до 255 (абсолютно белый)<sup>2</sup>.

Методы формирования и анализа изображений использовались также для оценки цвета азиатской лапши (Канада)<sup>3</sup>. Оценка цвета макаронных изделий учитывает наличие или отсутствие желтого цвета и чистоту тона, связанных с качеством сырья и соблюдением технологии производства. Оценка цвета макаронных изделий производится на колориметре Conika Minolta в системе Lab<sup>4</sup>.

Одним из показателей качества макаронных изделий, характеризующий товарный вид продукции, является цвет, зависящий от цвета муки. Поэтому для

---

<sup>1</sup> Автоматизация обработки микрофотографий молочных продуктов с использованием IMAGEJ и STATISTICA / В.К. Битюков [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 4 (62). С. 58-63.

<sup>2</sup> Климова Е.В. Использование анализа цифровых изображений для оценки степени потемнения картофеля после варки. (Канада) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. 2008. № 4. С. 1194.

<sup>3</sup> Shahin M.A., Hatcher D.W., Symons S.J. Use of imaging methods for assessment of Asian noodle color // Cereal Foods World; St. Paul.-2006.-Vol.51,N 4.-P. 172-175.-Англ.-Bibliogr.: p.175.

<sup>4</sup> Казеннова Н.К. Разработка метода оценки цвета макаронных изделий на колориметре KONIKA MINOLTA / Н.К. Казеннова, Д.В. Шнейдер, О.В. Соцкова // Плодоводство и ягодоводство России. - 2012. - Т. 33. - С. 209-215.

определения качества макарон важно получить объективные, количественные цветовые характеристики зерна озимой твердой пшеницы (зерна в нативном состоянии, цельносмолотого), муки высшего сорта (крупки): показатель «желтизны», рассчитанный по специальному алгоритму, и характеристика цвета проб в синем участке спектра в цветовом пространстве RGB. Изучение цветовых характеристик проведено с использованием экспериментального образца сканирующего анализатора, предназначенного для получения и анализа изображения исследуемой пробы в цифровом формате (СAM), в качестве основного узла которого использован стандартный планшетный сканер типа Epson Perfection. Экспериментальный образец сканирующего анализатора муки разработан во ВНИИЗ – филиале ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН совместно с ООО «НИЦ Интеллектуальные сканирующие системы»<sup>1</sup>.

Анализ изображений также лежит в основе цветометрической оценке качества пивоваренного ячменя. Эта оценка основана на показателях цвета на поверхности среза: качественный ячмень имеет светло-желтый или желтый цвет, зеленоватый оттенок указывает на незрелость зерна, а зерно красноватого, темного или серого цвета указывает на то, что оно было подмочено во время уборки или хранения и на нем развились микроорганизмы<sup>2</sup>.

Согласно ГоСТам, решающими в определении качества муки и крупы являются органолептические показатели (ГОСТ 26574, ГОСТ 5550, ГОСТ 6292, ГОСТ 26361, ГОСТ 22165), к которым помимо запаха и вкуса относится и цвет. Однако исследователями предпринимаются попытки и объективного количественного определения цвета круп и муки (гречиха, рис и пшеничная мука). Определение цифровых характеристик цвета круп проводилось в цифровом режиме RGB с применением планшетного сканера HP SJ2300c при разрешении 600

---

<sup>1</sup> Цветовые характеристики зерна озимой твердой пшеницы / Штейнберг Т.С. [и др] // Вестник ВСГУТУ. - 2018. - № 3 (70). - С. 67-74.

<sup>2</sup> Kozirok W. Cyfrowa analiza obrazu - zastosowanie w ocenie jakosci jeczmienia browarnego / W. Kozirok, L. Fornal, A. Jaloza // Przem. ferment. owoc.-warz.. - 2002. - T.46, N 12. - S. 24-27

дпи и глубиной цвета 24 бит, позволяющей различать около 17 млн оттенков цвета, что вполне достаточно для характеристики цвета объекта<sup>1</sup>.

Цветометрический метод применяется для оценки свежести мяса посредством цифровой видеорегирующей системы. В ходе анализа изображений мясного сырья с различными признаками и их цифровой обработки посредством специализированного программно-алгоритмического обеспечения определяются средние значения светлоты, доминирующей длины волны (тона) и насыщенности выделенной области цифрового изображения, которые могут быть использованы при установлении критериев сортировки мясного сырья<sup>2</sup>. Этими же авторами разработан колориметрический портативный анализатор, который позволяет оценивать свежесть мяса птицы и его качественные особенности, а также позволяет с высокой точностью контролировать их изменения<sup>3</sup>.

В исследовании<sup>4</sup>, посвященном оценке цвета мяса и мясных продуктов в системе Lab, выявлена более высокая эффективность системы компьютерного зрения (системы CVS) по сравнению с колориметром, традиционно используемым для этой цели.

Для объективной оценки качества колбасных изделий на основе численной обработки сканированных изображений разработана методика определения их цветовых характеристик: разностный контраст, профили интенсивности, а также изменение яркостных характеристик<sup>5</sup>.

Для оценки происхождения и качества розовых вин исследователи предлагают использовать трехмерную систему трихроматических координат CIE-Lab, позволяющую репродуцировать изображения и воспроизводить одни и те же

---

<sup>1</sup> Румянцев А.А. Определение цвета крупы и муки в цифровом режиме RGB / А.А. Румянцев, Р.Ф. Ярмиев // Молодежь и наука. - 2018. - № 1. - С. 34, С. 57.

<sup>2</sup> Цифровая видеосистема для определения и анализа цветовых характеристик мясного сырья. / А.Ф. Алейников [at al] // Сиб. Вестн. С.-х. науки. - 2013. - N 1. - С. 78-88.

<sup>3</sup> Портативный цветовой анализатор качественных изменений мяса птицы / И.Г. Пальчикова [и др.] // Достижения науки и техники АПК. - 2015. - Т. 29. - № 9. - С. 80-83.

<sup>4</sup> Томашевич И.Б. Система компьютерного зрения для измерения цветовых параметров мяса и мясных продуктов: обзор // Theory and Practice of Meat Processing. - 2018. - Т.3. - № 4. -С. 4-15.

<sup>5</sup> Ткаль В.А. Применение компьютерных технологий для исследования изменений цвета колбасных изделий / В.А. Ткаль, А.О. Окунев, А.В. Шараева // Мясная индустрия. - 2007. - № 9. - С. 34-37.

цвета независимо от особенностей устройства или аппаратных средств (монитора, принтера или компьютера). Определение соответствующих цветовых выражений вин на основе координат  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  осуществляли с помощью конвертера цвета. Обработку полученных экспериментальных данных проводили с использованием программы SPSS Statistica 17.0<sup>1</sup>.

Особое внимание уделено показателям хроматических характеристик вин: оттенок (Т) и интенсивность (I) цвета, доля красной окраски (dA), доли красных ( $D_{420}$ ), желтых ( $D_{520}$ ) и синих ( $D_{620}$ ) пигментов, угловой оттенок цвета ( $\text{tg } \alpha$ ), показатель желтизны (G). Расчетные показатели определялись с учетом значений оптической плотности при длинах волн 420, 520 и 620 нм.<sup>2</sup>

**Цветометрия в медицине.** Анализ литературы показал, что в настоящее время все способы оценки цвета, применяемые в условиях стоматологической клиники, можно разделить на две группы: визуальные и аппаратные. Первые предполагают оценку цвета зубов, цементов и пломбирочного материала посредством ее субъективного сравнения со стандартными шкалами оттенков: Vita, Chromascop, Vitapan 3D Master и другими. Аппаратные методы основаны на компьютерном анализе изображений, полученных в идеальных оптических условиях. Для создания изображений используются цифровые камеры, для их анализа - спектрофотометры и колориметры. Аппаратные методы позволяют получить для анализа объективные, количественные показатели цвета, тогда как визуальные методы оперируют качественными, описательными характеристиками. Поэтому недостатком визуальных методов является неточность, связанная с субъективным восприятием цвета и индивидуальной остротой зрения специалиста, недостаток методов второго типа - высокая стоимость оборудования. Чтобы нивелировать недостатки обоих методов, обычно их применяют в комплексе<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Червяк С.Н. Оценка цвета розовых вин с помощью системы CIELAB // Плодоводство и виноградарство Юга России. - 2020. - № 62 (2). - С. 113-121.

<sup>2</sup> там же.

<sup>3</sup> Карачаушева В.А. Способы определения цвета зубов в стоматологии // Бюллетень медицинских интернет-конференций. - 2015. - Т. 5. - № 10. - С. 1170.

В силу того, что человеческий зуб представляет собой сложную систему, для исследования его цвета в России был разработан прибор «Анализатор цвета дентальный компьютеризированный «АЦДк-01 «Спектродент», не имеющий отечественных аналогов и превосходящий по функциональности, точности и скорости измерения зарубежные аналоги: прибор ShadeEye-EX японской фирмы SHOFU и прибор SHADEScan канадской фирмы CYNOVAD<sup>1</sup>.

В судебной стоматологии проводятся исследования посмертных изменений цвета и прозрачности зубов<sup>2,3</sup>, а также колориметрическая оценка изменения цвета зубов при идентификации личности<sup>4</sup>.

Как отмечают специалисты, практически все изображения в настоящее время анализируются врачами визуально. Например, важным диагностическим показателем является цвет языка пациента и отклонение его от нормы. Практикующие специалисты дают визуальную оценку показателям *цветности* языка на основе шкалы цветов RAL. Для достижения поставленной цели мы использовали метод сравнения цвета языка со шкалой цветов RAL - международной системой соответствия цветов, используемой практически во всех отраслях<sup>5</sup>.

Цвет ногтей - важный показатель общего состояния организма, так и локальных поражений. В медицинской практике принята визуальная оценка состояния и окраски ногтей для диагностических целей<sup>6</sup>.

---

<sup>1</sup> Компьютеризированный способ определения цвета зубов / О.Л. Головков [и др.] // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова.-2004. -№1-2. - С.175-179.

<sup>2</sup> Манин А.И. Посмертные изменения цвета и прозрачности зубов и их судебно-медицинское значение / А.И. Манин, Е.Х. Баринов, П.О. Ромодановский // Судебная медицина. - 2019. - Т. 5. - № 1. - С. 16-18.

<sup>3</sup> Манин А.И. Исследование посмертных изменений цвета и прозрачности зубов / А.И. Манин, П.О. Ромодановский, Е.Х. Баринов // Медицинская экспертиза и право. - 2014. - №4. - С.31-33.

<sup>4</sup> Лукиных Л.М. Колориметрическая оценка изменения цвета зубов при идентификации личности / Л.М. Лукиных, М.Л. Жданова // Dental Forum. - 2008. - № 3. - С. 24-27.

<sup>5</sup> Владимирова Е.В. Использование шкалы RAL в качестве индикатора для определения цвета языка / Е.В. Владимирова, Н.А. Валитова, А.Н. Плакуев // Современная медицина: актуальные вопросы. - 2015. - № 42-43. - С. 67-72.

<sup>6</sup> Панкратов О.В. Патология ногтей - индикатор общих или кожных заболеваний. Часть 2 / О.В. Панкратов, Р.Ю. Шикалов, В.Г. Панкратов // Здравоохранение (Минск). -2016. - №5. - С.45-49.

Доказана достоверность диагностики состояния организма на основе морфометрических показателей (цвет и форма ногтевой пластинки, цвет и структура радужки глаза, форма поверхности кожи лица, ладоней и пр.)<sup>1</sup>.

На основе цветометрического анализа разработан метод определения границы жизнеспособности тонкой кишки при формировании энтеро-энтероанастомоза в условиях перитонита, который включает осмотр ее стенок с последующим сравнением цвета и отека поврежденного и неповрежденного отрезков кишки<sup>2</sup>.

Однако для инструментальных цветометрических медицинских исследований имеются системы автоматизированного анализа и модификации изображений, используются аппараты (например, «Olympus» CF Q180AL и H180AL), оснащенные режимами узкоспектрального изображения (NBI), позволяющих четче дифференцировать микрокапиллярную сеть, предположить возможную гистологическую структуру выявленного новообразования. Используемая для инструментального анализа цифровых изображений программа «Градиент» распределяет по цвету точки изображения в цветовой модели RGB и анализирует зависимость скорости изменения цвета точек от расстояния между ними<sup>3</sup>.

Изучены формальные характеристики цветности изображений характерных деструктивных изменений в органах и тканях больных с сочетанной инфекцией ВИЧ и туберкулезом. Статистический анализ данных проводился программой Gradient, рассчитывающей распределение по цвету точек изображения и скорость изменения цвета точек при изменении их положения (автор программы - д.ф.-м.н. А.Н. Герасимов)<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Захаров И.Г. К вопросу о количественной проверке нетрадиционных методов диагностики / И.Г. Захаров, О.Ф. Тырнов // Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Серия Медицина. - 2001. - № 2 (523). - С. 84-90.

<sup>2</sup> Михайличенко В.Ю. Метод определения границы жизнеспособности тонкой кишки при формировании энтеро-энтероанастомоза в условиях перитонита / В.Ю. Михайличенко, Я.Я. Маслов // Вестник неотложной и восстановительной хирургии. - 2016. - Т.1. - №2. - С. 211-215.

<sup>3</sup> Автоматизированный анализ изображений полипов кишечника / И.В. Ярема [и др.] // Сеченовский вестник. - 2015. - № 4 (22). - С. 12-16.

<sup>4</sup> Статистический анализ изображений макро- и микропрепаратов ткани легких и кишечника у больных вич-инфекцией на стадии вторичных заболеваний / Д.Д. Арутюнова [и др.] // Русский медицинский журнал. Медицинское обозрение. - 2019. - Т. 3. - № 9-1. - С. 38-42.

Применение специально фильтрованного светового луча наряду с компьютерной обработкой цифровых фотографий позволяет регистрировать реакции агглютинации эритроцитов, повышает надежность регистрации иммунных эритроцитарных комплексов, а, следовательно, определения групповой принадлежности крови человека<sup>1</sup>.

Разработано приложение для смартфона, позволяющее измерять пульс через изменения цвета кожи пальца руки, которые возникают из-за пульсации крови. Процесс измерения выглядит очень просто: пользователь прикладывает палец к камере, после чего приложение на мобильном телефоне начинает захватывать и анализировать кадры, полученные с камеры. Анализируя средние значения красной компоненты кадров с камеры мобильного телефона, содержащих изображение участка кожи, можно сделать вывод о частоте пульса<sup>2</sup>.

Методом иридодиагностики (визуально по светлomu цвету глаз, голубому цвету склер) выявляются дегенеративно-дистрофические и деструктивно-воспалительные заболевания височно-нижнечелюстных суставов у пациентов, развивающиеся вследствие слабости соединительной ткани<sup>3</sup>.

Кроме того, цвет зубов - цель и результат работы эстетической стоматологии<sup>4</sup>, а значит, является объектом изучения как врачей-теоретиков, так и практикующих стоматологов<sup>5,6</sup>

---

<sup>1</sup> Яркость RGB компонент фотоизображения образцов крови, освещенной специально фильтрованным световым потоком / Дубровский В.А. [и др.] // Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2013. - Т. 3. - № 3. - С. 643.

<sup>2</sup> Лаурэ Д.А. Разработка алгоритма измерения частоты пульса человека с помощью камеры мобильного телефона / Д.А. Лаурэ, Н.С. Лагутина, И.В. Парамонов // Моделирование и анализ информационных систем. - 2014. - Т. 21. - № 4. - С. 91-103.

<sup>3</sup> Воловар О.С. Клиническая характеристика состояния соединительной ткани организма при заболеваниях височно-нижнечелюстного сустава методом иридодиагностики, с учетом состояния склер, патологии органа зрения / О.С. Воловар, В.А. Маланчук, О.А. Крыжановская // Вестник стоматологии. 2010. - № 4 (73). - С. 54-59.

<sup>4</sup> Магомедбекова М.В. Сравнительный анализ выбора оптимального метода определения цвета зубов // Международный студенческий научный вестник. / 2019. - № 5-2. - С. 28.

<sup>5</sup> Сравнительная оценка визуального и колориметрического методов определения цвета зубов / А.В. Севбитов [и др.] // Dental Forum. - 2015. - № 1. - С. 19-20.

<sup>6</sup> Профессиональное отбеливание зубов. аспекты цвета / Ю.С. Высочанская [и др.] // Институт стоматологии. - 2015. - № 2 (67). - С. 38-39.

**Цветометрия в этнографии и антропологии.** Цвет кожи, глаз, волос человека является одним из основных расово-диагностических признаков, поэтому его анализ также широко используется в антропологических исследованиях. Цвет кожи у людей всех рас определяется пигментами: меланином (коричневый цвет), гемоглобина (красноватый оттенок) и каротина (желтоватый оттенок). У каждого человека своя комбинация этих трех элементов, которая дает уникальный оттенок кожи. Для визуальной оценки цвета кожи разработаны и используются шкалы цветов. Например, шкала Лушана (Von Luschan Chromatic Scale) - шкала изменчивости - представляет собой набор эталонных образцов из 36 опаловых стекол разной окраски от бледно-желтого и розовато-белового до настоящего черного<sup>1</sup>. Шкала Фитцпатрика (1975) — числовая шкала, включающая шесть фототипов кожи: кельтский, нордический, темный европейский, средиземноморский индонезийский, афроамериканский. Шкала Рубина Глогау помогает определить состояние кожи человека благодаря оценке степени фотоповреждений. Шкала Робертса - самая точная диагностическая система, объединяющая шкала Фитцпатрика и таблицы Глогау и позволяющая определить пять тысяч фототипов кожи человека<sup>2</sup>. Для определения цвета волос чаще всего используются следующие шкалы: шкала цвета волос Е. Фишера (27 образцов разного цвета), Е. Фишера и К. Заллера (40 номеров) и шкала В.В. Бунака (18 номеров, разбитых на три ряда - красновато-оранжевый, желтовато-оранжевый и серый или пепельный)<sup>3</sup>. Оценку цвета радужной оболочки глаз осуществляют по шкалам Р. Мартина и В. В. Бунака. Шкале В. В. Бунака включает три основных типа

---

<sup>1</sup> Физическая Антропология. Иллюстрированный толковый словарь. Шкала Лушана [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://es.niv.ru/doc/dictionary/physical-anthropology/fc/slovar-216.htm>, дата доступа: 15.05.2020.

<sup>2</sup> Липатов П.И. Основы антропологии с элементами генетики человека / П.И. Липатов, Л.Н. Липатова // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bio.1sept.ru/article.php?ID=200304306>, дата доступа: 10.05.2020.

<sup>3</sup> Цвет волос [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://gufo.me/dict/biological\\_anthropology/%D0%A6%D0%B2%D0%B5%D1%82\\_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%81](https://gufo.me/dict/biological_anthropology/%D0%A6%D0%B2%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%81), дата доступа 11.05.2020.

окраски глаз — тёмный (чёрный, бурый и жёлтый цвета), светлый (серый, голубой и синий цвета) и смешанный (включает цвета первых двух типов)<sup>1</sup>

Исследователи применяют в работе как визуальные методы на основе вышперечисленных шкал цветов<sup>2</sup>, так и инструментальные, отличающиеся большей степенью объективации. Для инструментального определения цвета кожи представителей разных рас и народов исследователи предлагают использовать спектрофотометр с последующей статистической обработкой результатов путем определения ранговой корреляции Спирмена<sup>3</sup>. Кроме того, разработано программное обеспечение, позволяющее автоматически определять цвет радужки по 12-классовой шкале Бунака<sup>4</sup>

**Цвет в криминалистике, судебной медицине и экспертизе.** В ходе проведения разного рода судебно-экспертных исследований цвет является одной из характеристик объекта, дающих о нем информацию: при судебно-медицинской экспертизе помогает установить характер и сроки образования повреждений; при исследовании нефтепродуктов –определить соответствие топлива ГОСТу; при автотехнической экспертизе анализ цвета полезен для идентификации повреждений на кузове автомобиля с целью определения одновременности их образования и т.п. Поэтому в ходе проведения экспертиз установление цветовых характеристик выступает важнейшей и неотъемлемой частью исследования. Исследователи определяют перечень способов описания цвета в ходе экспертизы:

1. Визуальное определение цвета сотрудником («на глаз»), осуществляемое на личном опыте и цветовосприятии или с помощью криминалистического

---

<sup>1</sup> Дорофеева А.А. История развития методов изучения цвета глаз (ретроспектива шкал для определения пигментации и структуры радужки) / А.А. Дорофеева, Ю.В. Лоскутова, М.А. Негашева // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология. -2012.-№2.-С.111-122.

<sup>2</sup> Бацевич В.А. Изучение секулярных изменений цвета глаз у населения Архангельской области / В.А. Бацевич, Ю.В. Лоскутова, М.А. Негашева // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология. - 2013. - № 1. - С. 104-110.

<sup>3</sup> Чумакова А.М. Спектрофотометрические данные по цвету кожи бедуинов южного Синая (по материалам экспедиции Тель-Авивского университета 1979-1982 гг.) / А.М. Чумакова, Е.Д. Кобылянский // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология.-2014. - № 1. - С. 102-106.

<sup>4</sup> Применение компьютерных технологий для изучения цвета радужки в антропологии / А.А. Дорофеева [и др.] // Морфология. - 2010. - Т. 137. - № 2. - С. 71-76.

атласа цветов<sup>1</sup> (упрощенной версией метрологического атласа Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И.Менделеева.) с 24-ступенным хроматическим рядом.

2. Точное инструментальное определение характеристик цвета с помощью электронного колориметра в одной из колориметрических систем (XYZ, RGB). Как правило, колориметр применяется в проведении экспертиз физико-химической направленности<sup>23</sup>

3. Измерение цветовых характеристик объекта с помощью спектрофотометра посредством анализа спектрального состава отраженного или прошедшего через вещество излучения. Современные спектрофотометры применяют для измерения оптической плотности прозрачных растворов и твердых тел и дают возможность определить концентрацию вещества в растворе посредством измерения скорости изменения плотности. В судебной экспертизе с помощью спектрофотометров исследуют окрашенные растворы преимущественно при производстве физико-химических экспертиз<sup>4</sup>.

4. Также предлагается метод анализа цвета посредством создания изображения объекта с помощью средств цифровой фиксации (цифровые фотоаппараты, камерофоны (цифровые фотоаппараты, вмонтированные в смартфоны), планшетные сканеры, цифровые видеокамеры, входящие в комплект с микроскопом)<sup>5</sup> и последующего определения цветовых характеристик объекта исследования в общепринятых системах: RGB, CMYK, HLS, HTML Hex, C++ Hex, Photoshop с помощью компьютерной программы, например, такой, как «ColorMania 6.3», разработанная фирмой «Blacksun Software» для платформ Windows версий от 8 и выше. Затем для подбора цветов и генерации цветовых

---

<sup>1</sup> Криминалистический атлас цветов. М.: ОУ МВД СССР, 1986.

<sup>2</sup> Литвинов А.В. О необходимости цифровой стандартизации оценки цвета в практике судебно-медицинских экспертиз / А.В. Литвинов, В.И. Витер, А.Ю. Вавилов // Проблемы экспертизы в медицине. - 2013. - Т. 13. - № 3 (51). - С. 33-36.

<sup>3</sup> Коковихин А.В. Цвет, колориметрия и световая спектроскопия в судебной медицине // Проблемы экспертизы в медицине. - 2007. - Т. 7. - № 2 (26). - С. 30-31.

<sup>4</sup> там же.

<sup>5</sup> Проблемы восприятия и оценки цвета в судебной медицине / А.Д. Бирючевский [и др.] // Проблемы экспертизы в медицине. - 2009. - Т. 9. - № 2-3 (34-35). - С. 37-39.

схем исследователи предлагают использовать онлайн-инструмент «ColorScheme», созданный для операционной системы Windows и имеющий встроенный справочник наименований 1017 цветов, применяемых в художественной сфере, а также конвертер цвета, предназначенный для перевода значений RGB в другие цветовые модели (HSL, HSB/HSV, CMYK, LAB, XYZ)<sup>1</sup>.

Также для анализа цифровых изображений предлагают использовать компьютерные программы, свободно распространяемые для некоммерческого использования: просмотрщик изображений IrfanView и программу анализа цвета пикселя экрана ColorPix<sup>23</sup>. Кроме того, изображения повреждений анализируют в программной среде MathCAD путем определения величин каналов системы RGB<sup>4</sup>

**Цветометрия в зоологии.** Цвет в зоологии является одним из основных морфологических признаков особи на всех стадиях развития. Например, на основании цвета особей, обусловленного пигментацией тела и определяемого визуально, выделяют от трех до пяти цветовых морф трепанга<sup>5</sup>. Также замечена зависимость концентраций металлов Cd, Cu, Zn, Fe, Mn в стенке тела, кишке и гонадах голотурии *Eupentacta fraudatrix* двух цветных форм (с розовой и оранжевой окраской) от органа и цвета покровов тела. Отмечена большая защищенность оранжевой формы голотурии от возможного токсичного действия кадмия по сравнению с розовой формой<sup>6</sup>.

---

<sup>1</sup> Иванов А.В. Определение цветовых характеристик объекта исследования компьютерными средствами в ходе проведения судебной экспертизы / А.В. Иванов, К.В. Протасов // Общество и право. - 2019. - № 4 (70). - С. 69-74.

<sup>2</sup> Литвинов А.В. Расчетный способ установления давности формирования кровоподтека на основе цифровой формализации его цвета / А.В. Литвинов, С.В. Чирков, А.Ю. Вавилов // Проблемы экспертизы в медицине. - 2014. - Т. 14. - № 4 (56). - С. 20-22.

<sup>3</sup> Витер В.И. О возможности количественной характеристики цвета кровоподтека при определении давности его образования / В.И. Витер, А.В. Литвинов, С.В. Чирков // Фундаментальные исследования. - 2014. - № 10-5. - С. 869-872.

<sup>4</sup> Цветовой анализ цифровых изображений при производстве экспертных исследований следов выстрела / И.Г. Пальчикова [и др.] // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2015. - № 2 (27). - С. 88-101.

<sup>5</sup> Ковалев Н.Н. Цветовые формы дальневосточного трепанга *Apostichopus Japonicus* (Selenka) / Н.Н. Ковалев, С.Е. Лескова // Научные труды Дальрыбвтуза. - 2019. - Т. 50. - № 4. - С. 43-53.

<sup>6</sup> Долматова Л.С. Особенности накопления тяжелых металлов в тканях двух цветных форм голотурии *EUPENTACTA FRAUDATRIX* в летне-осенний период / Л.С. Долматова, Е.Н.

Определяемый визуально свет внутренних органов и наличие пигментированных хроматофоров на поверхности тела - ключевое различие между личиночными стадиями камчатского краба (*Paralithodes camtschaticus* (Tilesius)) и синего краба (*Paralithodes platypus* (Brandt)), обусловленное обитанием с гоизонтах воды с разной степенью освещенности<sup>1</sup>.

В пределах ареала вид белка-летяга (*Pteromys volans*) представлен 10 под-видами, определяемыми по цвету. В связи с этим исследователями разработана оригинальная методика инструментального определения окраски шкурки зверьков на основании объективных колориметрических параметров - «белизна» и «оттенок красного», которые можно определить количественно через значения RGB (значения красного, зеленого и синего фильтров) в графических редакторах. Белизна представляет собой среднее арифметическое из значений показателей R, G и B, а оттенок красного - отношение показателя R к белизне<sup>2</sup>.

Также изучены микрофотографии и способ формирования цвета кожи и плавников рыб, имеющих красную и оранжевую окраску: кеты (*Oncorhynchus keta*) в брачном наряде, самцов гуппи (*Poecilia reticulata*), самца меченосца (*Xiphophorus hellerii*), золотой рыбки (*Carassius auratus*) и европейского (речного) окуня (*Perca fluviatilis*)<sup>3</sup>. В результате изучения изменчивости окраски (цвета и рисунка) тела у взрослых особей прыткой ящерицы *Lacerta agilis* выявлено 10

---

Слинько, Л.Ф. Колосова // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. - 2018. - № 1 (197). - С. 71-78.

<sup>1</sup> Борисов Р.Р. Влияние интенсивности освещения на окраску личинок камчатского (*PARALITHODES CAMTSCHATICUS* (TILESIUS)) и синего (*PARALITHODES PLATYPUS* (BRANDT)) крабов (DECAPODA, LITHODIDAE) / Р.Р. Борисов, Д.С. Печёнкин // Зоологический журнал. - 2018. - Т. 97. - № 10. - С. 1231-1237.

<sup>2</sup> Внутривидовая дифференциация окраски зимнего меха *PTEROMYS VOLANS* (SCIURIDAE, MAMMALIA) в пределах ареала / С.Н. Гашев [и др.] // Nature Conservation Research. - Заповедная наука. - 2019. - Т. 4. - № 4. - С. 65-72.

<sup>3</sup> Яржомбек А.А. Красный и оранжевый цвет покровов рыб / А.А. Яржомбек, К.А. Жукова // Труды ВНИРО. - 2018. - Т. 170. - С. 72-77.

вариантов окраски туловища<sup>1</sup>. А цвет тела молодежи мидии *Mytilus galloprovincialis* может рассматриваться как один из показателей скорости их роста<sup>2</sup>.

Кроме того, цвет является предметом изучения поведенческих реакций животных. Например, учеными отмечен избирательный интерес морских птиц ареала северных морей Евразии к предметам различной окраски<sup>3</sup>. Также исследованы цветовые предпочтения брюквенницы (*Pieris napi*) в связи с ее трофическим поведением. Выявлено, что имаго данного вида после выхода из куколок в поисках объектов питания предпочитают модели синего или красного цвета, в значительно в меньшей степени - желтого<sup>4</sup>.

В целях разработки эффективных электрических инсектицидных ловушек были изучены особенности цветовосприятия летающих насекомых. В частности, выяснено, что комнатную муху более всего привлекают поверхности с диагональными полосами коричневого и желтого цветов, освещенные лампами, излучающими световые волны зеленой и ультрафиолетовой (А) части спектра, близкой к видимому спектру<sup>5</sup>.

Изучение цветовосприятия серых тюленей важно для создания биотехнических систем двойного назначения, которые используются для охраны морских объектов и прибрежной инфраструктуры (противодействие подводным диверсантам, поиск и подъем затонувших и дрейфующих объектов). Эксперимент показал высокую способность животных дифференцировать спектральные цвета

---

<sup>1</sup> Епланова Г.В. Анализ окраски прыткой ящерицы из двух популяций Самарской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2016. - Т. 18. - № 5-2. - С. 264-274.

<sup>2</sup> Казанкова И.И. Рост молодежи средиземноморской мидии (*MYTILUS GALLOPROVINCIALIS*, *BIVALVIA*, *MYTILIDA*) у открытых берегов южного и юго-западного Крыма в зависимости от глубины и принадлежности к цветовой морфе / И.И. Казанкова, П.В. Гайский, А.А. Котолупова // Зоологический журнал. - 2018. - Т. 97. - № 11. - С. 1317-1329.

<sup>3</sup> Харитонов С.П. Манипуляционно-исследовательская активность у морских птиц: поведенческая реакция на предъявленные на колонии искусственные объекты // Зоологический журнал. 2018. - Т. 97. - № 4. - С. 426-443.

<sup>4</sup> Нужнова О.К. Влияние цветовых предпочтений на трофическое поведение брюквенницы (*PIERIS NAPI*.) / О.К. Нужнова, Н.В. Василевская // Сибирский экологический журнал. - 2013. - Т. 20. - № 1. - С. 61-67.

<sup>5</sup> Ван Лиероп Р. Значение цвета и узора для электрических инсектицидных ловушек // Пест-Менеджмент. - 2013. - № 2 (86). - С. 32-34.

друг от друга и от их монохромных аналогов и наличие хорошо развитого цветового зрения<sup>1</sup>.

Рассмотрение аномалий цвета глаз медоносных пчел является предпосылкой для изучения обуславливающих их генетических заболеваний насекомых<sup>2</sup>.

В лабораторных условиях выявлена высокая степень зависимости окраски тела (количества дермальных меланофоров) личинок гладкой шпорцевой лягушки (*Xenopus laevis*) в зависимости от цвета фона контейнеров<sup>3</sup>.

В исследовании цвета раковин моллюсков литторин (*Littorina Obtusata*) цвет рассматривается как определяющий фенотипический признак вида. Для получения количественных параметров цвета посредством компьютерного сканера Epson Perfection 1670 Photo были созданы цифровые изображения исследуемых раковин, сканирование проводили при 1200 dpi. Измерение цвета проводили с помощью программного обеспечения ImageTool в международной колориметрической системе МКО RGB<sup>4</sup>.

Цветометрические и морфометрические методы использованы в изучении гонадогенеза у взрослых и ювенильных самок японского мохнаторукого краба *Eriocheir japonicus* (Crustacea: Decapoda, Grapsida), обитающих в реках Приморья. Диаметр ооцитов определяли с помощью компьютерной программы Scion Image 01 Цветовые характеристики яичников на разных стадиях зрелости гонад

---

<sup>1</sup> Ишкулов Д.Г. Особенности цветовосприятия у серых тюленей / Д.Г. Ишкулов, А.Л. Михайлюк, М.В. Пахомов // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2013. - № 4 (15). - С. 84-90.

<sup>2</sup> Мониторинг аномалий цвета глаз медоносных пчел / В.Н. Саттаров [и др.] // Морфология. - 2016. - Т. 149. - № 3. - С. 181-182.

<sup>3</sup> Джапова В.В. Влияние фона стенок контейнеров на пигментацию личинок XENOPUS LAEVIS / В.В. Джапова, С.М. Стародубов, В.А. Голиченков // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. - 2012. - № 2. - С. 19-22.

<sup>4</sup> Лезин П.А. Цветовые характеристики элементов окраски раковины LITTORINA OBTUSATA (GASTROPODA, PROSOBRANCHIA) и эффективность их использования при выделении фенотипических групп / П.А. Лезин, Е.В. Козминский // Зоологический журнал. - 2008. - Т. 87. - № 1. - С. 29-35.

определяли визуально с помощью атласа цветов Манселла<sup>1</sup> посредством цифровых изображений, сделанных под микроскопом LABOVAL4 с помощью цифровой фотокамеры Olimpus, Япония<sup>2</sup>.

**Цветометрия в животноводстве.** Также визуально оценивается цвет настрига шерсти верблюдов при приемке<sup>3</sup>, цвет опушения у хорьков клеточного разведения для определения характера наследования основной и общей окраски, а также для получения максимального количества зверей желательного типа<sup>4</sup>.

Исследователями выявлена взаимосвязь массы и длины тела с массой шкурки и подкожного жира у норок разных цветов, оцененных визуально, а также породные различия по этим показателям<sup>5</sup>, а у самок соболя визуально оцененный цвет может служить прогностическим показателем плодовитости<sup>6</sup>

Оценку цвета шкурок соболя проводили инструментально методом их сканирования с использованием графического пакета Corel Draw 13.0, а также приложения Corel PHOTO-PAINT. Цвет определяли в системах RGB и HLS<sup>7</sup>. Аналитическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью пакета программ Microsoft Office 2007<sup>8</sup>.

Как отмечают исследователи, цвет - один из важнейших потребительских свойств меховых товаров. Натуральная природная окраска волосяного покрова

---

<sup>1</sup> Munsell book of color: glossy finish collection: removable samples in two binders. - Baltimore: Munsell color, Macbeth. - 1976. - 75 p.

<sup>2</sup> Калинина М.В. Созревание и цветовые характеристики яичников японского мохнаторукого краба *ERIOCHEIR JAPONICUS* / М.В. Калинина, Н.А. Винникова, Е.Г. Семенькова // Онтогенез. - 2008. - Т. 39. - № 1. - С. 58-65.

<sup>3</sup> Болат-Оол Ч.К. Характеристика шерсти верблюдов Республики Тыва / Ч.К. Болат-Оол, С.Д. Монгуш, В.Г. Двалишвили // Овцы, козы, шерстяное дело. - 2016. - № 1. - С. 45-46.

<sup>4</sup> Федосеева Г.А. Разнообразие окраски опушения у хорьков // Достижения науки и техники АПК. - 2012. - № 4. - С. 53-57.

<sup>5</sup> Морфометрические показатели норок в зависимости от породы / Ходусов А.А. [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. - 2018. - № 4 (34). - С. 79-83.

<sup>6</sup> Бекетов С.В. Связь между окраской волосяного покрова и репродуктивностью самок соболей клеточного содержания / С.В. Бекетов, Т.И. Казакова // Кролиководство и звероводство. - 2012. - № 2. - С. 16-19.

<sup>7</sup> Цвет в промышленности / Под ред. Р. Мак-Дональда. – Пер. с англ. под ред. Ф.Ю. Телегина. – М.: Логос, 2002. – 596 с.

<sup>8</sup> Запорожец О.В. Определение цветового типа шкурок соболя с применением компьютерной техники / О.В. Запорожец, А.И. Сапожникова, А.Н. Квашук // Кролиководство и звероводство. - 2013. - № 3. - С. 21-22.

особую ценность представляет для шкурок соболя, куницы, норки, лисицы и т. д. Наиболее приемлемой цветовой моделью для использования в колориметрии пушно-меховых шкурок можно считать модель CIE L\*a\*b\*<sup>12</sup>.

**Цветометрия в ботанике, растениеводстве и лесоводстве.** Цвет растений тесно связан с их физиологией, поэтому может служить диагностическим показателем их состояния. Так, с помощью библиотеки цветов Pantone проводится визуальный анализ цвета листовых пластинок модельных растений? используемых для озеленения в городе и растущих в различных условиях как соотношения пигментов хлорофилла, ксантофилла и каротина<sup>3</sup>. Индукция флуоресценции хлорофилла в сравнении с анализом цветковых показателей показала более точные результаты и отношении спелости плодов<sup>4</sup>

Разработана интеллектуальная система на основе средств компьютерного зрения, предназначенная для автоматизации контроля состояния растений. Система обеспечивает классификацию изображений растений на два класса - «здоровые растения» и «больные растения» по нормированным гистограммам цветовой составляющей H в модели HSV (HSB) для оттенков зеленого цвета<sup>5</sup>.

Динамика цвета рассматривается как показатель изменений состояния растения для оценки риска воздействия негативных факторов<sup>6</sup> Листья сканировали с верхней и нижней стороны (сканер EPSON Perfection 1270 в режиме: 24 бит,

---

<sup>1</sup> Кожина А.И. Основы теории и практика использования количественной оценки показателей цвета в меховом производстве / А.И. Кожина, А.И. Сапожникова, А.С. Окутин // Дизайн и технологии. - 2018. - № 64 (106). - С. 23-30.

<sup>2</sup> Колориметрическая градация выделанных шкурок лисицы красной клеточного разведения / Кожина А.И. [и др.] // Дизайн и технологии. - 2018. - № 66 (108). - С. 35-44.

<sup>3</sup> Барышова Е.О. Анализ цвета листовых пластин / Е.О. Барышова, А.И. Довганюк // Вестник ландшафтной архитектуры. - 2016. - № 7. - С. 10-14.

<sup>4</sup> Судник Ю.А. Способ определения зрелости томатов на основе контроля их индукции флуоресценции хлорофилла / Ю.А. Судник, Абделхамид М. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". - 2020. - № 1 (95). - С. 51-54.

<sup>5</sup> Интеллектуальная система распознавания состояния растений / Ю.А. Шестакова [и др.] // Вестник Технологического университета. - 2018. - Т. 21. - № 10. - С. 175-180.

<sup>6</sup> Золотарева Е.Ю. Мультиспектральный анализ изображений зеленых растений для идентификации стрессовых состояний / Е.Ю. Золотарева, А.Г. Зотин, А.А. Тихомиров // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. - 2012. - Т. 1. - № 8. - С. 355-356.

300 dpi), полученные изображения обрабатывали с помощью программы ImageJ ver. 1.41 h, используя подпрограмму GLCM Texture Tool для анализа текстуры и подпрограмму RGB Measure<sup>1</sup>.

Окраска и цветовой узор листьев кротона (*Codiaenum varieagum*) анализировали с использованием программы ImageJ в режиме RGB после обработки изображений в графическом редакторе Adobe Photoshop Elements<sup>2</sup>. Как показал эксперимент, методом тонкослойной хроматографии возможно качественное обнаружение каротиноидов плодов рябин и облепихи<sup>34</sup>. Также

Люминесценцию тканей плодов облепихи крушиновидной исследовали с использованием люминесцентного микроскопа марки Микромед-3 Люм<sup>5</sup>. Посредством обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии с диодно-матричным и масс-спектрометрическим детектированием исследован видовой состав антоцианов цветков катарантуса (*Catharanthus roseum*)<sup>6</sup>.

Цвет плодов, создаваемый пигментами, - один из ключевых показателей их спелости и качества. Основными пигментами во фруктах является каротиноиды и антоцианы. Антоцианы – пигментные вещества из группы гликозидов, обуславливающие красную, фиолетовую бордовую, розовую и синюю окраски плодов и листьев. Для образования и накопления антоцианов во всех растениях необходим свет. В условиях похолодания действие света на накопление антоцианов в растениях усиливается. Суммарное определение содержания антоцианов

---

<sup>1</sup> Кузьмичева Н.А. Текстура поверхности и цвет в макроскопическом анализе листьев / Н.А. Кузьмичева, Г.Н. Бузук, Н.А. Горковчук // Вестник фармации. - 2013 - № 4 (62) - С.17-27.

<sup>2</sup> Простой метод анализа двумерных цветных изображений листьев растений Шимои Х. [и др.] // Физиология растений. - 2006. - Т. 53. - № 1. - С. 139-147.

<sup>3</sup> Тринеева О.В. Исследование каротиноидного состава плодов облепихи крушиновидной различных сортов методом тонкослойной хроматографии / О.В. Тринеева, М.А. Рудая, А.И. Сливкин // Химия растительного сырья. - 2020. - № 1. - С. 223-228.

<sup>4</sup> Содержание каротиноидов в плодах некоторых представителей рода *SORBUS* L. при интродукции / Абдуллина Р.Г. [и др.]// Химия растительного сырья. - 2020. - №1. - С.229-235.

<sup>5</sup> Тринеева О.В. Применение люминесцентной микроскопии в анализе анатомо-диагностических признаков плодов облепихи крушиновидной / О.В. Тринеева, А.А. Гудкова, М.А. Рудая // Разработка и регистрация лекарственных средств. - 2020. - Т. 9. - № 1. - С. 40-45.

<sup>6</sup> Определение видовой состава антоцианов цветков *CATHARANTHUS* / Дейнека В.И. [и др.]// Аналитика и контроль. - 2019. - Т. 23. - № 1. - С. 103-109.

проводили спектрофотометрическим методом на спектрофотометре Konica Minolta 600D и с помощью динамики канала L (светлота) цветовой модели Lab<sup>1</sup>.

Для определения питательной ценности проводят визуальный анализ цветковых характеристик мякоти и корки арбузов<sup>2</sup>. Также при изучении морфологических признаков семян цветов осуществляется визуальное оценивание цвета<sup>3</sup>

Важнейшая характеристика качества семян - степень их вызреваемости; о ней можно судить по окраске. С целью выяснения степени зрелости семян овощей проведена цифровая морфометрия семян по шкале аддитивной цветовой модели RGB с использованием серийного программного обеспечения «ВидеоТест-Морфология» («Argus-BIO»), производства ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург. Цифровые изображения семян были получены с использованием цифрового планшетного сканера HPScanJet 200.<sup>4</sup>

Также с целью установления зависимости между цветовыми характеристиками семян ели и географическим положением еловых древостоев с помощью цветового сканера и компьютера в цветовом пространстве RGB окраска оценивалась семян ели<sup>5</sup>. Отмечен большой полиморфизм по цвету семенной кожуры, определяемому и визуальными методами<sup>6</sup>

Для создания альтернативных технологий искусственного лесовосстановления ведется разработка новых неразрушающих методик оптического контроля семян. Основанием для проведения таких исследований является различная по-

---

<sup>1</sup> Юсупов Г.А. Влияние света на антоцианы яблок / Г.А. Юсупов, Б.А. Сауир // Theoretical & Applied Science. - 2015. - № 12 (32). - С. 122-125.

<sup>2</sup> Бочерова И.Н. Симфония вкуса и цвета / И.Н. Бочерова, С.В. Малуева, О.Г. Вербитская // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. -2018.- №13. - С.352-356.

<sup>3</sup> Минжал М.Ш. Морфометрические признаки семян некоторых видов рода IRIS L. в Саратовской области / М.Ш. Минжал, В.А. Болдырев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. - 2016. - Т. 16. - № 4. - С. 404-410.

<sup>4</sup> Цифровая морфометрия семян овощных культур / Ф.Б. Мусаев [и др.] // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. - 2019. - № 12 (12). - С. 176-182.

<sup>5</sup> Попов П.П. Фотоколориметрическая оценка семян ели // Лесоведение.-2005.- № 4. - С. 78-80.

<sup>6</sup> Чернодубов А.И. Наследование цвета семенной кожуры потомствами сосны обыкновенной // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2001. - № 3. - С. 134-136.

глошающая способность семенной кожуры при воздействии инфракрасного излучения. При этом возможна более точная градация семян по цвету, которая позволяет выявлять нежизнеспособные семена по содержанию гидроксильных групп в кожуре. Исследование проводили путем измерения фотометрических величин семенной кожуры и их спектров с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ-2201<sup>1</sup>.

Древесину можно рассматривать как многокомпонентный композиционный материал, состоящий из гемицеллюлозы, целлюлозы, лигнина и др. компонентов. Для улучшения свойств древесины широко используется ее термическая обработка. Термодеструкция является сложным многостадийным физико-химическим процессом: изменяется состав, структура и, как следствие, свойства древесины. Причем каждый из компонентов разлагается в своем диапазоне температур, что обуславливает многостадийность процесса. Для определения цветовых характеристик древесины как функции степени завершенности отдельных стадий термической деструкции использована модель разложения цвета на RGB-составляющие. Проведена термообработка образцов и идентификация их цвета, исследована зависимость RGB-параметров от времени и интенсивности термообработки, определены параметры термического воздействия, позволяющие получить древесину с заданной степенью термического разложения<sup>2</sup>.

**Цветометрия в экологии.** Внимание исследователей-экологов привлекает, в частности, проблема гармонизации цвета природной среды на экологических тропах с точки зрения психофизиологического воздействия цвета на психику людей<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Новиков А.И. Исследование спектрометрических параметров семенной кожуры сосны обыкновенной в ИК-диапазоне / А.И. Новиков, В.В. Саушкин // Лесотехнический журнал. - 2018. - Т. 8. - № 3 (31). - С. 6-15.

<sup>2</sup> Ермоченков М.Г. Изменение цвета древесины березы при тепловом воздействии / М.Г. Ермоченков, А.В. Хроменко // Лесотехнический журнал. 2017. - Т. 7. - № 3 (27). - С. 15-21.

<sup>3</sup> Буянова Д.В. Оценка сезонных изменений цветовой среды на экологических тропах г. Москвы / Д.В. Буянова, А.И. Довганюк // Вестник ландшафтной архитектуры. - 2018. - № 15. - С. 16-21.

Мультиспектральные данные дистанционного зондирования Земли, полученные со спутников Landsat 7 и Sentinel 2 используются для выделения растительных сообществ (исследователи изучают полученные снимки и по ним выделяют однородные по определенным признакам (цвет, микротекстура рисунка, фототоны и др.)) участков растительности. Вегетационный индекс NDVI позволяет выделить различные экосистемы: сосновые, лиственные леса и луговые фитоценозы, а также распознать водные объекты и открытые почвы<sup>1</sup>.

Спутниковые наблюдения открывают новые возможности для исследования цветений массовых видов фитопланктона. По биооптическим параметрам вод поверхностного слоя водоема, полученным со спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua выполнены статистические оценки связи между среднемесячными значениями концентрации хлорофилла и рассеяния взвешенных частиц в Северном, Среднем и Южном Каспии<sup>2</sup>.

В целях выявления загрязнений окружающей среды разработан метод фотометрического определения диоксида, основанный на свойстве диоксида образовывать в хромовой смеси (смесь бихромата калия (хромпика) и серной кислоты) продукт, окрашенный в коричневый цвет и экстрагируемый н-гексаном<sup>3</sup>. Также используется микроспектрометрический метод для обнаружения в воде двух наиболее важных для окружающей среды анионов - фторида и цианида<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Methodological techniques for identifying plant communities based on earth remote sensing data and field research / Т.А. Adamovich [at al] // Теоретическая и прикладная экология. - 2019. - № 2. - С. 39-43.

<sup>2</sup> Салинг И.В. Оценка взаимосвязи между биооптическими параметрами вод поверхностного слоя в разных регионах Каспийского моря по данным спутниковых сканеров цвета / И.В. Салинг, О.В. Копелевич // Труды международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». - 2015. - Т. 8. - С. 129-133.

<sup>3</sup> Сюткин В.Н. Фотометрический метод определения диоксинов // Твердые бытовые отходы. - 2007. - № 10 (16). - С. 28-29.

<sup>4</sup> Кудреватых А.А. Разработка оптических хемосенсоров для обнаружения цианид-ионов в водных средах / А.А. Кудреватых, Т.П. Мартыанов, Л.С. Клименко // Вестник Югорского государственного университета. - 2019. - № 1 (52). - С. 82-87.

В природоохранной деятельности цвет используется как показатель состояния различных сред окружающей среды: этой цели служит визуальное оценивание цвета водоемов<sup>1</sup>, инструментальный анализ показателей содержания фитопланктона, органического вещества, взвеси осуществляется учеными по данным о цвете вод, полученных со спутниковых датчиков MODIS-Aqua и GOCI-COMS<sup>2</sup>, проводятся исследования цветений массовых видов фитопланктона, в частности, кокколитофоридных цветений в Баренцевом и Черном морях<sup>3,4,5</sup>.

**Цветометрия в почвоведении.** Цвет почвы выступает как показатель, характеризующий ее минералогический и химический состав и поэтому является предметом многочисленных исследований. Для объективизации визуальных методов оценки цвета почв применяется треугольник почвенных окрасок.

Цветовые характеристики позволяют диагностировать генетические горизонты почвы, почвенные типы и подтипы. Многие показатели отражательной способности почвы указывают на содержание в ней гумуса, соединений железа, карбонатов, сульфатов, хлоридов. Они позволяют оценивать масштабы засоления почв, их загрязнения нефтью, степень повреждения. Наконец, на их основе

---

<sup>1</sup> Назаренко С.Н. Показатели качества поверхностных вод реки Псел бассейна Днепра // Ученые записки учреждения образования Витебская ордена Знак почета государственная академия ветеринарной медицины. - 2014. - Т. 50. - № 1-1. - С. 192-195.

<sup>2</sup> Штрайхерт Е.А. Сезонные и суточные распределения показателей содержания фитопланктона, органического вещества, взвеси в Амурском заливе и прилегающей области по спутниковым данным / Е.А. Штрайхерт, С.П. Захарков // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. - 2018. - № 1 (197). - С. 102-109.

<sup>3</sup> Сравнительные оценки характеристик кокколитофоридных цветений в Баренцевом и Черном морях по данным спутниковых сканеров цвета / Копелевич О.В. [и др.] // Труды международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». - 2015. - Т. 8. - С. 31-35.

<sup>4</sup> Карабашев Г.С. Об информативности съемки морских прибрежий спутниковыми сканерами цвета океана / Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко // Океанология. - 2013. - Т. 53. - № 6. - С. 750.

<sup>5</sup> Оценка зон цветения фитопланктона на Красноярском водохранилище на основе спутниковых данных AVHRR И MODIS // М.Ю. Чернецкий [и др.] // Исследование Земли из космоса. - 2006. № 2. - С. 89-96.

составляют почвенные карты и картограммы, осуществляют почвенно-экологический мониторинг<sup>1</sup>. В частности, учеными разработан комплекс измерения органического содержания почвы по цветовой системе RGB<sup>2</sup> и по системе Lab<sup>34</sup>. Как отмечают исследователи, различия цвета почвы в красноте a\* и желтизне b\* можно использовать для идентификации доминирующего типа Fe-пигмента в почвах, а величина светлоты L почвы свидетельствует о содержании в ней гумуса<sup>5</sup>. Также исследования показали, что оценка цвета почвы в координатах пространства CIELAB позволяет выделить ее основные горизонты и соответствия между ними как во влажном, так и в сухом состоянии<sup>6</sup>.

Поскольку, по мнению специалистов, традиционно применяемая оптическая система Манселла неудобна для оценки роли пигментов в цвете почв статистическими методами, учеными, для уточнения данных о цвете и для снижения субъективного фактора учеными составлена таблица<sup>7</sup> и разработана современная методика<sup>8</sup> для перевода визуальных данных о цвете почв из шкалы Манселла в систему CIE-L\*a\*b\*.

---

<sup>1</sup> Мишин Б.С. Цвет и диагностика почв / Б.С. Мишин, Т.А. Некрасова // Наука и Образование. - 2019. - № 4. - С. 294.

<sup>2</sup> Казымова Ф.Т.Г. Исследование взаимосвязи индекса RI и колориметрических показателей измерения органического содержания почвы//Аграрный научный журнал.-2020.-№ 1.-С.13-16.

<sup>3</sup> Линейная регрессия между параметрами цвета CIE-LAB и содержанием органического вещества в почвах чайных плантаций / Ч. Йонген [и др.]//Почвоведение.-2018.-№ 2.-С.197-202.

<sup>4</sup> Кириллова Н.П. Анализ цвета почв с использованием цифровой фотокамеры / Н.П. Кириллова, Т.М. Силёва // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. - 2017. - № 1. - С. 16-23.

<sup>5</sup> Водяницкий Ю.Н. Использование системы CIE-L\*A\*B\* для характеристики цвета почв / Ю.Н. Водяницкий, Н.П. Кириллова // Почвоведение. - 2016. - № 11. - С. 1337-1346.

<sup>6</sup> Диагностика почвенных горизонтов по цвету (на примере почв Подмосковья) / Кириллова Н.П. [и др.] // Почвоведение. - 2018. - № 11. - С. 1363-1371.

<sup>7</sup> Водяницкий Ю.Н. Перевод цветовых показателей почвы из системы Манселла в систему CIE-L\*A\*B\*: таблицы и примеры расчета / Ю.Н. Водяницкий, Н.П. Кириллова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. - 2016. - № 4. - С. 3-11.

<sup>8</sup> Кириллова Н.П. Перевод цветовых характеристик почвы из системы Манселла в систему CIE-L\*A\*B\*/Н.П.Кириллова, Ю.Н.Водяницкий, Т.М.Силёва//Почвоведение.-2015.-№ 5.-С.527.

Также проводится работа по кластеризации образцов почв по их цвету, определенному в системе RGB. Для нахождения гистограмм ученые использовали библиотеку компьютерного зрения OpenCV 2.4.10<sup>1</sup>. Кластеризацию полученных данных проводили с помощью пакета STATISTICA 6<sup>2</sup>. По данным литературы, с помощью цифрового фотоаппарата получены числовые величины цвета структурно-дифференцированных почв Волжско-Камской лесостепи (Luvisols) в системе цвета RGB, HSB и L\*a\*b<sup>3</sup>. Для обработки изображений образцов почв и получения количественной информации об их цвете применена компьютерная программа Land damage expert<sup>4</sup>.

Разработана оригинальная методика характеристики цвета профилей почв, образцов и почвенных мазков в полевых дневниках на основе компьютерной диагностики в Adobe Photoshop в системах CIE-Lab, RGB и CMYK при сканировании цветных фотографий, мазков почв, негативов фотографий с использованием сканера Epson Perfection2450 и ICC-профиля, а также определения площадей и периметров цветовых пятен с помощью программ Mapinfo<sup>5</sup>.

Также для объективной оценки цвета почв в полевых условиях исследователи используют прибор Gretag Macbeth Eye-One Photo и программное обеспечение Eye-One Share 1.4 и Profile Maker 5.0.<sup>6</sup>

---

<sup>1</sup> Разработка мультимедийных приложений с использованием библиотек OPENCV и IPP / А.В. Бovyрин [и др.] // М.: ИНТУИТ, 2016 – 515 с.

<sup>2</sup> Боровиков В.П., Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. Учебное пособие для вузов / В.П. Боровиков // М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 288 с.

<sup>3</sup> Валеева А.А. Оценка цвета лесостепных почв с помощью цифровой фотосъемки в лабораторных условиях / А.А. Валеева, А.Б. Александрова, Г.Ф. Копосов // Почвоведение. - 2016. - № 9. - С. 1101-1106.

<sup>4</sup> Булыгин С.Ю. Оценка гумусированности почв путем обработки их цифровых фотоизображений / С.Ю. Булыгин, Д.И. Бидолах, Ф.Н. Лисецкий // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. - 2011. - № 15 (110). - С. 154-159.

<sup>5</sup> Использование компьютерной диагностики для объективной характеристики цвета почв / В.И. Савич [и др.] // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. - 2004. - № 4. - С. 38-51.

<sup>6</sup> Оценка цвета почв в полевых условиях с использованием прибора GRETAG MACBETH EYE-ONE PHOTO / Р.Ф. Байбеков [и др.] // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. - 2007. - № 4. - С. 23-28.

Кроме того, аналогично с изучением водоемов, почвы исследуют на основании снимков высокого разрешения, полученных со спутников. Так, по данным космических снимков исследователями определены динамические изменения в разнообразии почв Западного Прикаспия с дифференциацией функционирующих почв и ареалов поверхностных отложений. Кроме того, составлена шкала засоления почв, определены характер и степень накопления солей<sup>1</sup>.

**Цветометрия в океанологии.** Спутниковые фотографии также позволяют получить большой объем данных для океанологии. Так, по данным спутниковых сканеров о цвете океана ученые исследуют возможность индикации придонного переноса<sup>2</sup>.

Согласно другой методике, по данным измерений цветовым сканером MODIS восходящего излучения морской поверхности вычисляется индекс цвета водоема, дающий информацию о пространственных распределениях концентрации хлорофилла<sup>3</sup>.

**Цветометрия в геологии.** В морской геологии цвет донных отложений является важным признаком: он даёт первичное представление об их вещественном составе, среде осадконакопления и её временной динамике, а также о степени и характере постседиментационных изменений. В приведенном исследовании<sup>4</sup> измерен цвет проб донных отложений в цветовых моделях RGB, HSL, причем исследователи отмечают наибольшую информативность показателя S.

В геологических исследованиях цвет породы определяется ее физическим состоянием: составом, возрастом и степенью метаморфоза. И, как отмечают ученые, даже визуальное определение цвета отложений иногда позволяет наметить

---

<sup>1</sup> Залибеков З.Г. Методы изучения разнообразия почв западного Прикаспия по космическим снимкам высокого разрешения / З.Г. Залибеков, А.Б. Биарсланов // Исследование Земли из космоса. - 2018. - № 4. - С. 59-70.

<sup>2</sup> Карабашев Г.С. Об индикации придонного переноса на морском мелководье по данным спутникового сканера цвета океана / Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко, С.В. Шеберстов//Океанология. - 2009. - Т.49. - №1. - С.28-36.

<sup>3</sup> Кушнир В.М. Индекс цвета в северо-западной части Черного моря по данным сканера MODIS / В.М. Кушнир, С.В. Станичный // Исследование Земли из космоса. - 2007. - № 4. - С. 62-73.

<sup>4</sup> Первая цветометрическая характеристика донных отложений Чукотского моря / А.Н. Колесник [и др.] // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 487. - № 4. - С. 448-454.

расхождения в степени окрашенности в одновозрастных и, особенно, разновозрастных моренах, что часто помогает в полевых условиях предварительному расчленению ледниковых горизонтов<sup>1</sup>.

Для визуальной характеристики цвета ученые используют цветовые характеристики донных осадков, полученные с применением Munsell Soil Colour Chart, цифровые параметры цвета получают на основе данных рентгенофлуоресцентного анализа. Результаты исследования<sup>2</sup> показали, что цвет донных осадков в значительной степени зависит от минерального состава (от отношения Mn/Al).

**Цветометрия в климатологии.** В рамках программы Глобальной системы наблюдений за климатом (Global Climate Observing System, GCOS) в перечень основных климатических параметров океана, необходимых для систематических наблюдений с целью оценки климатических изменений на Земле, входят биооптические (биогеохимические и биологические/ экосистемные) переменные - «цвет океана» (восходящее излучение (Water Leaving Radiance) и концентрация хлорофилла-а) и «фитопланктон». Лишь излучение видимой области спектра способно с малыми потерями проходить через поверхность моря, поэтому только с помощью датчиков (сканеров цвета) можно получить информацию о характеристиках подповерхностного слоя океана и происходящих в нем процессах<sup>3</sup>.

Концентрации перечисленных компонентов являются важными параметрами при комплексном описании климатических систем, например, при исследовании процессов функционирования фитопланктонных сообществ или углеродного цикла. На цвет океана влияет количество фитопланктона, растворенных органических и взвешенных веществ, поскольку они определяют изменчивость

---

<sup>1</sup> Рунков С.И. Цвет неоплейстоценовых морен на территории Мордовии / С.И. Рунков, В.Н. Маскайкин // Современные проблемы территориального развития. - 2019. - № 2. - С. 11.

<sup>2</sup> Соотношение цвета и химического состава четвертичных донных осадков из южной части поднятия Менделеева и континентального склона Восточно-Сибирского моря / М.А. Левитан [и др.] // Геохимия. - 2014. - № 3. - С. 233.

<sup>3</sup> Копелевич О.В. Использование биооптических параметров океана, определяемых по спутниковым данным, в качестве основных климатических переменных / О.В. Копелевич, А.Г. Костяной // Фундаментальная и прикладная климатология. - 2018. - Т. 3. - С. 8-29.

восходящего излучения моря. Поэтому для адекватных суждений об изменениях климата очень важно правильно измерять и интерпретировать эти данные<sup>1</sup>.

**Цвет в астрономии.** Надо отметить, что для ученых-астрофизиков свет и цвет космических объектов является основным показателем их состояния и процессов, на них происходящих. Поэтому и сегодня основным разделом науки о космосе остается оптическая астрономия, изучающая электро-магнитное излучение (свет и цвет) небесных объектов и разрабатывающая методы его изучения<sup>2</sup>.

Итак, анализ научной литературы показал, что цветометрические методы проведения научных исследований в формате обработки цифровых изображений по цветности в разных системах измерения цвета становятся все более популярными в самых различных отраслях познания. Надо отметить, что общими для всех этих направлений является использование единых алгоритмов. Визуальный анализ цвета - это сравнение цвета изучаемого объекта со шкалами цветов, разработанными специально для данного класса объектов изучения. Инструментальный (аппаратный) анализ цвета основан на компьютерной обработке изображений, созданных с помощью цифровой техники, и получения количественных характеристик цвета в общепринятых системах цветности (цветовых моделях), а также применение единых устройств оцифровки аналитического сигнала<sup>3</sup>.

Таким образом, в настоящее время цветометрия представляет собой универсальный, перспективный и конкурентноспособный аналитический метод, обладающий многими преимуществами:

- доступность оборудования и программного обеспечения для анализа;
- невысокая стоимость анализа;

---

<sup>1</sup> Салюк П.А. Проблемы спутникового зондирования цвета океана при исследовании климатообразующих процессов // Труды международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». - 2015. - Т. 8. - С. 40-45.

<sup>2</sup> Сичевский С.Г. Метод определения параметров звезд на основе их многоцветной фотометрии // Астрономический журнал. 2012. - Т. 89. - № 9. - С. 787.

<sup>3</sup> Черноусова О.В. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа / О.В. Черноусова, О.Б. Рудаков // Химия, физика и механика материалов. - 2019. - № 2 (21). - С. 55-125.

- высокая скорость и мобильность, возможность проведения идентификации и количественных определений на месте;
- достаточно хорошая чувствительность;
- увеличение количества информации в результате повышения числа фиксируемых аналитических сигналов.

Недостатком цветометрического анализа, в частности, биологической цветометрии, остается недостаточная методическая и сущностная разработанность. Необходимо расширять объектную базу методики и инструменты перевода цветовой информации об объекте в информацию о его состоянии в исследуемых условиях.

#### **1.2.4 Морфометрия как метод исследования**

Среди неинвазивных методов изучения биологических объектов морфометрические исследования занимают достойное место, поскольку форма живого организма и его размеры позволяют охарактеризовать биологический объект, в частности, с точки зрения условий его среды обитания и степени приспособленности к ним, пищевой специализации, способам добывания пищи и других важных биологических особенностей. Изменение формы живого организма и его размерных показателей является отражением многих физиологических реакций и процессов, в нем происходящих в ходе онтогенеза и в результате обмена веществом с окружающей средой. Анализ литературы показал, что в настоящее время изучение формы биологического объекта является способом получения информации об особенностях развития растений.<sup>1</sup> С этой целью учеными созданы средства инструментальной оценки морфометрических показателей растения: в Сибирском физико-техническом институте аграрных проблем СФНЦА РАН разработан виртуальный прибор «Листомер»<sup>2</sup>,

---

<sup>1</sup> Математическая модель биометрических показателей растения салата (*LACTUCA SATIVA* L.) в светокультуре при различных дозах облучения / Ракутько С.А. [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. - 2016. - № 89. - С. 118-127.

<sup>2</sup> Гурова Т.А. Использование виртуального прибора "Листомер" для определения площади поражения листьев / Т.А. Гурова, О.С. Луговская, Е.А. // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. - 2016. - № 6 (263). - С. 82-89.

предназначенный для определения общей и поврежденной площади листьев растений и степени их поражения болезнями, вредителями и другими негативными факторами окружающей среды.

При озеленении городских объектов широко используются цветочные травянистые растения. Поэтому для повышения гармоничности цветочных композиций на объектах озеленения при исследовании декоративных качеств растений ученые учитывают их важные морфометрические показатели - цвет и фактуру листовых пластинок, цветков и соцветий, включающую рельефность и блеск поверхности.<sup>1</sup>

Кроме того, морфометрический метод используется также для описания текстуры поверхности листа растений с помощью статистического и структурного методов. Структурный метод характеризует текстуру на основе равномерно расположенных параллельных линий. Статистический подход основан на пространственных частотах и характеристиках текстуры (гладкой, грубой, гранулированной и т.д.). В рамках статистического подхода к анализу текстуры применяются автокорреляционная функция и матрица смежности – Gray Level Cooccurrence Matrices (GLCM), предполагающая вычисление около двадцати признаков пикселей сканированного изображения, наиболее важные из которых – энергия, энтропия, обратный момент разности, инерция, корреляция, оттенок, контраст, второй угловой момент, дисперсия, гомогенность. Интересно, что макроскопический анализ текстуры листьев по идее ученых сочетается с анализом его цветовых характеристик с помощью программы Imagej 1.4 с использованием в качестве основной подпрограммы RGB Measure.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Хохлачева Ю.А. Оценка фактуры поверхности травянистых растений // Лесотехнический журнал. - 2012. - № 1 (5). - С. 34-42.

<sup>2</sup> Кузьмичева Н.А. Текстура поверхности и цвет в макроскопическом анализе листьев / Н.А. Кузьмичева, Г.Н. Бузук, Н.А. Горковчук // Вестник фармации. - 2013. - № 4 (62). - С. 17-27.

Также морфометрический метод важен и при изучении характер эволюции паттернов развития покрытосеменных растений. При анализе различий между соцветиями растений одного вида ученые выясняют: варианты перехода от базового к нестандартному плану строения и причины такого перехода.<sup>1</sup>

На основе морфогенетической оценки состояния древесных растений - индикаторов исследователи выясняют возможности ранней индикации снижения биологической устойчивости лесных экосистем Брянской области в условиях радиоактивного загрязнения цезием-137. Морфогенетическая оценка биологической устойчивости лесных насаждений проведена на основе сравнения морфометрических параметров хвоинок сосны обыкновенной, листовых пластин березы повислой, отобранных в различных зонах загрязнения. Обработка отсканированных изображений листьев и хвои осуществлялась в полуавтоматическом режиме с использованием программы MapInfo 9.0 Pro. Причем, как отмечают ученые, использование морфогенетических методов оценки биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения позволяет выявлять снижение биологической устойчивости на более ранних стадиях, чем традиционные методы, применяемые при лесопатологическом мониторинге лесов<sup>2</sup>.

В зоологии анализ формы тела животных имеет свою специфику. Например, для распознавания пола дрозофилы по фотоснимкам ученые предлагают метод решения этой задачи на основе анализа формы брюшка дрозофилы с использованием непрерывной морфологической модели. Эта модель состоит из много-

---

<sup>1</sup> Ремизова М.В. Шаг вверх, два шага вниз: порядок заложения органов цветка // Онтогенез. - 2019. - Т. 50. - № 6. - С. 407-423.

<sup>2</sup> Морфогенетическая оценка биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения / Д.Ю. Ромашкин [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. - 2019. - Т. 23. - № 2. - С. 84-91.

угольной фигуры, аппроксимирующей тело дрозофилы, и скелета этой многоугольной фигуры. При этом скелет имеет вид геометрического графа, образованного множеством точек центров вписанных в фигуру окружностей.<sup>1</sup>

Также морфометрические исследования полезны при изучении сезонных изменений формы тела животных. Так, были проведены измерения частей скелета рыб при изучении динамики внешних морфологических признаков и относительной длины позвонков из разных отделов позвоночника при смолтификации у дикой молодежи лососёвых.<sup>2</sup>

Кроме того, морфометрические измерения помогают выявить эволюционные закономерности формирования форм тела у животных. Например, в результате анализа данных о строении твёрдых покровов у костнопанцирных бесчелюстных рыб (*Osteostraci*, *Agnatha*) палеонтологи выявили геометрические закономерности формирования возможных вариантов рельефа панциря при морфогенезе наружного скелета позвоночных (*Vertebrata*) и показали, что уже у ранних позвоночных существовал механизм, обеспечивающий реализацию полного набора вариантов формирования скульптуры различных типов.<sup>3</sup>

При изучении человеческого организма сравнительная анатомия и позволяют понять организацию формообразования и обосновать механизмы органогенеза человека. Морфометрические измерения частей человеческого тела на разных этапах развития помогли ученым сделать вывод, что в основе механики развития органов лежат неравномерный рост: соотношение темпов роста органов детерминирует взаимные влияния органов на развитие друг друга, в зависимости от соотношения их размеров. Морфогенез происходит в эволюционной цепи он-

---

<sup>1</sup> Распознавание пола дрозофилы по фотоизображениям / Л.М. Местецкий [и др.] // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. - 2019. - № 4. - С. 80-84.

<sup>2</sup> Закономерности изменений внешней морфологии и осевого скелета у молодежи лососёвых рыб (*SALMONIDAE*) в связи со смолтификацией / К.В. Кузищин [и др.] // Вопросы ихтиологии. 2019. Т. 59. № 5. С. 531-546.

<sup>3</sup> Афанасьева О.Б. Экзоскелет позвоночных: геометрические закономерности формирования рельефа панциря у ранних бесчелюстных (*AGNATHA*, *VERTEBRATA*) // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 489. - № 1. - С. 99-102

тогенезов на основе сопряжения структуры и функции, через разные формы взаимодействий. Результаты исследований показали зависимость строения животных от типа их питания (яркий пример - слепая кишка грызунов, всеядных и растительноядных) и подвижности (слепая кишка дегу и морской свинки).<sup>1</sup>

Морфометрические технологии находят свое применение также и в социальной сфере. В условиях цифровизации всех сфер жизни людей технологии идентификации людей и обнаружения лиц находят все большее применение в системах технического зрения, робототехнике, системах видеонаблюдения и контроля доступа, в интерфейсах взаимодействия «человек-компьютер». В ответ на запросы общества ученые предложили алгоритм, направленный на выделение области лица с помощью методики, объединяющей метод Виолы - Джонса и способ обнаружения кожи с использованием метода кодирования цветовых пространств (Log opponent и YIQ).<sup>2</sup> Другой предложенный учеными алгоритм распознавания и идентификации лиц предполагает использование трехмерных поверхностей лиц без использования информации о цвете и текстуре изображения лица. Этот метод основан на конформном отображении поверхностей лиц на риманово многообразие с последующим сопоставлением конформных и изометрических инвариантов, вычисленных в этом многообразии.<sup>3</sup>

Итак, морфометрия - достаточно гибкий по средствам и целям метод, позволяющий решать разнообразные задачи в разных областях науки.

---

<sup>1</sup> Петренко Е.В. Эволюционные основы морфогенеза // Бюллетень науки и практики. - 2019. - Т. 5. - № 3. - С. 40-57.

<sup>2</sup> Эрман Е.А. Метод обнаружения лиц на изображении с использованием комбинации метода Виолы - Джонса и алгоритмов определения цвета кожи / Е.А. Эрман, Мохаммед Гомаа Мохаммед Мамдух // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 1. С. 49-55.

<sup>3</sup> Метод распознавания лиц с использованием трехмерных поверхностей / Б.А. Эчеагарай-Патрон [и др.] // Информационные процессы. - 2016. - Т. 16. - № 2. - С. 170-176.

## 2 Методика исследования

**Объект исследования.** Объектом экспериментов является бесполоая раса пресноводных червей планарий *Dugesia (Girardia) tigrina*. Планарии содержались в термостатируемом помещении при температуре  $26 \pm 0,5^\circ\text{C}$ , их кормили личинками двукрылых (режим кормления - 2 раза в неделю). Для экспериментов отбирали планарий длиной около 10 мм. Опытные и контрольные группы планарий содержались в чашках Петри ( $d=100$  мм) с 30 мл аквариумной воды с  $dH \approx 10$  градусов,  $pH \approx 6,5$ . В каждой чашке находилось по 30 планарий.

**Методы исследования.** В методику неинвазивного контроля физиологических процессов у планарий входит комплекс методов (табл. 2.1).

Таблица 2.1 Методы неинвазивного контроля

	Метод	Оборудование
1	Метод регистрации хемилюминесценции (ССФЭ)	Хемилюминометр Биотокс-7А, оснащенный фотоумножителем 9750QB/1 (9750QB/1, EMI Electronics LTD, Middlesex, UK), область спектральной чувствительности 380–710 нм.
2	Микрофотоспектральный метод	Портативный цифровой микроспектрофотометр GretagMacbeth Eye-One Pro
3	Метод цифровой биоцветометрии	Микроскоп Stemi2000C с видеокамерой AxioCam MRc, ПО Adobe Photoshop CS6 Extended
4	Метод прижизненной компьютерной морфометрии	Рабочая установка с микроскопом Stemi 2000-C, ПО Plana 5.0

Все используемые методы основаны на анализе динамики морфометрических показателей животных и позволяют неинвазивно регистрировать изменения физиологического состояния *in situ*.

### 2.1 Метод регистрации хемилюминесценции

Для измерения люцигенин-зависимой регенерации планарий использовали хемилюминометр Биотокс-7А 2М (АНО «Инженерный центр – экология», Россия) (рис. 2.1).



**Рис. 2.1 Прибор для регистрации ССФЭ - хемилуминометр Биотокс-7А 2М**

Прибор оснащён фотоумножителем 9750QB/1 (9750QB/1, EMI Electronics LTD, Middlesex, UK), область спектральной чувствительности составляет 380–710 нм. Темновой ток составляет около 25 имп./сек, спектральный диапазон 380-710 нм и максимальная чувствительность лежит в районе 450 нм. Окно ФЭУ расположено сбоку по отношению к измеряемому образцу.

Измерения ССФЭ проводили при температуре  $20,0 \pm 0,2^\circ\text{C}$ , в режиме счета фотонов с интервалом записи данных 1 с.

**Подготовка животных к эксперименту.** В эксперименте по регистрации динамики сверхслабого свечения планарий участвовали 3 группы животных по 30 особей в каждой группе, одна группа - контрольная и две опытные. Кормление животных прекращали за 7 дней до опытов.



**Рис. 2.2 Схема декапитации экспериментальных животных**

После ампутации головной части тела животных (рис. 2.2) головной и хвостовой фрагменты тела животных поместили на 24 часа в хемилюминометр в емкостях с раствором стимулятора образования АФК – люцигенина ( $10^{-6}$ М) в 10 мл культуральной воды. В емкости с опытными группами животных добавляли вещества, стимулирующие и ингибирующие регенеративные процессы: в одну группу - хемотактический пептид N-формилметионил-лейцил-фенилаланин fMLP (в концентрации  $10^{-9}$  М/л) - стимулятор продукции АФК, в другую - апоцинин ( $10^{-4}$  М/л), ингибитор альфа NADH-оксидазы (АФК-системы).

Бактериальный пептид N-формилметионил-лейцил-фенилаланин (FMLP) действует как стимулятор, активируя лейкоциты и другие типы клеток путем связывания с рецепторами G-белков. Поэтому формилметионин-содержащие пептиды и белки являются частью системы врожденного иммунитета, также они участвуют в формировании других физиологических и патологических реакций организма.

Апоцинин (ацетованилон) представляет собой ароматическое соединение фенольной группы; благодаря ингибированию про-оксидативного фермента NADPH-оксидазы фагоцитарных клеток апоцинин является антиоксидантом: под действием клеточных пероксидаз и перекиси водорода мономерный апоцинин переходит в димерное состояние и приобретает способность ингибировать НАД-Н-оксидазы, тем самым угнетать образование АФК в клетке.

## **2.2 Микроспектофотометрический метод исследования**

Использование микроспектофотометрического метода позволило изучить спектральные характеристики планарий *in vivo* в процессе фагоцитоза. Спектральные характеристики регистрировались посредством цифрового спектрофотометра GretagMacbeth Eye-One Pro (рис. 2.3). Цифровой спектрофотометр GretagMacbeth Eye-One Pro позволяет рассчитывать цветовые координаты в различных цветовых системах. При измерении в отраженном свете используется геометрия измерения  $45/0^\circ$ , а источником света является газоразрядная вольфрамовая лампа типа А голографическая дифракционная решетка позволяет производить спектральный анализ в диапазоне от 380 до 730 нм с шагом 10 нм.



**Рис. 2.3 Цифровой спектрофотометр GretagMacbeth Eye-One Pro**

Исследуемый объект освещается светом, а отраженное световое излучение раскладывается в спектр с использованием голографической дифракционной решетки и системы фотодатчиков.

В эксперименте использовалась группа планарий из 30 особей после недельного голодания. Покормленные планарии на короткое время (не более 1 минуты) высаживались на влажную белую поверхность (значения цветовых каналов R, G, B поверхности равнялись 255), и с помощью спектрофотометра регистрировались спектральные характеристики животных. Регистрация повторялась через 5 часов, затем через 24 часа. Полученные данные для анализа экспортировались в формат MS Excel.

### **2.3 Цветометрический метод исследования**

Цветометрическим методом исследована реакция организма планарий *in vivo* на холодовое и болевое воздействие. К эксперименту по исследованию реакции планарий на холодовое воздействие было привлечено три группы животных по 30 особей в каждой. Животные были помещены в холодную воду (+12° C): 1 группа - на 1 минуту, 2 группа - на 5 мин., третья группа - на 10 мин. затем, после охлаждения, животных возвращали в воду комнатной температуры (+22° C).

Количественные цветовые характеристики планарий были получены посредством анализа их стандартных цифровых изображений. Животных фотографировали до охлаждения и сразу после него.

Для создания цифровых изображений планарий был использован рабочий комплекс, состоящий из бинокулярного микроскопа Stemi 2000-C, оснащенного видеокамерой AxioCam MRc (фирма «Zeiss»), и персонального компьютера со специализированным программным обеспечением (рис. 2.4). Изображения создавались в стандартных условиях при дневном (солнечном) освещении.



**Рис. 2.4 Рабочий комплекс для создания изображений**

Созданные изображения экспериментальных животных анализировались в программе Adobe Photoshop CS6 Extended (рис. 2.5). Для получения количественных показателей цвета поверхности тела планарий регистрировались величины каналов цветовых моделей HSB и RGB.

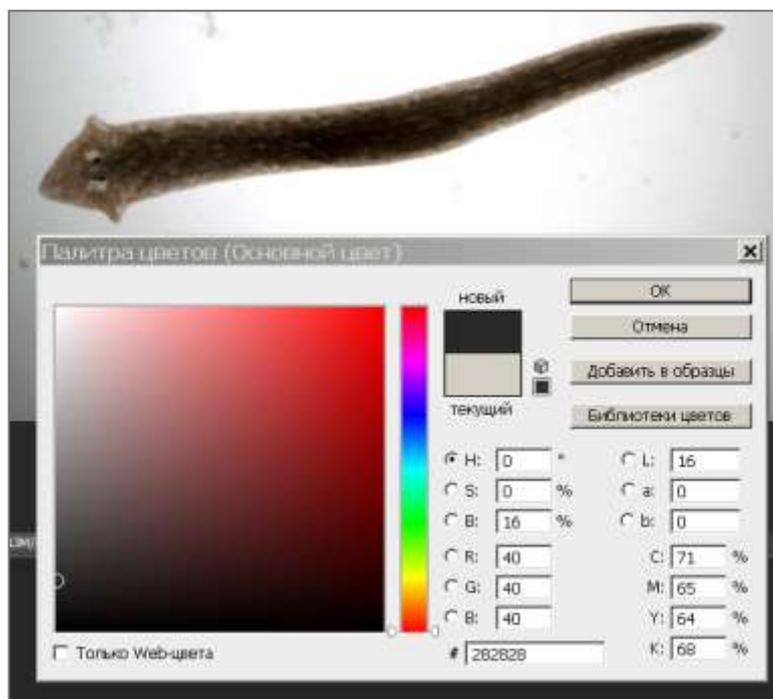


Рис. 2.5 Интерфейс ПО Adobe Photoshop CS6 Extended

Сайты регистрации включали область головного ганглия, глазки Гессе и область глотки животных (рис. 2.6).



Рис. 2.6 Сайты регистрации цветových характеристик

**Алгоритм анализа цветových характеристик.** Анализ полученных количественных цветových показателей цвета проводился в программе MS Excel. Реакция животных на охлаждение оценивалась по следующим цветovým характеристикам: длина волны, теплота, абсолютный и относительный состав цвета, яркость, насыщенность цвета.

Длина волны рассчитывалась из средневзвешенного среднего величин канала Н (тон) цветового пространства HSB (табл. 2), яркость В и насыщенность S - абсолютные величины модели HSB.

Таблица 2.2 **Контроль метода**

Показатель	Фильтры					
	без фильтра	красный (656 нм)	оранж (600 нм)	зеленый (551 нм)	голубой (490 нм)	синий (486 нм)
						
Длина волны, нм	440	665	610	550	515	480
Частота, ТГц	650	405	495	565	606	628
Энергия фотонов, эВ	2,72	1,73	2,04	2,34	2,50	2,60

Расчетные характеристики цвета цвета были получены из величин цветовой модели RGB (средние значения каналов R, G, B) по следующим формулам:

- теплота =  $\frac{R}{\Sigma(G,B)}$ ;
- относительный цвет: красный =  $\frac{R}{\Sigma(R,G,B)}$ , синий =  $\frac{B}{\Sigma(R,G,B)}$ , зеленый =  $\frac{G}{\Sigma(R,G,B)}$ .

#### 2.4 Метод прижизненной компьютерной морфометрии

Метод изучения морфометрических (размерных) показателей планарий во время регенерации основан на визуальной регистрации контраста между старыми (пигментированными) и новыми (не покрытыми пигментом) частями тела животных.

В основе метода использованы следующие особенности биологии и морфогенеза планарий:

- 1) сохранение у регенерантов способности к достаточно длительному одностороннему движению в горизонтальной плоскости, что важно для получения стандартных изображений в проекции сверху;
- 2) отсутствие на поверхности бластемы пигментного эпителия, что позволяет четко определять границу между бластемой и пигментированной остаточной частью тела.

Размер бластемы зависит от количества клеток в ней, следовательно, этот параметр можно считать определенным показателем пролиферации и использовать в качестве непрямого показателя числа клеток.

Планарии были подвергнуты декапитации. Затем для создания цифровых изображений планарий был использован рабочий комплекс, состоящий из бинокулярного микроскопа Stemi 2000-C, оснащенного видеокамерой AxioCam MRc (фирма «Zeiss»), и персонального компьютера со специализированным программным обеспечением (рис. 15). Изображения создавались в стандартных условиях при дневном (солнечном) освещении.

Цифровые изображения животных обрабатывались в специализированной программе Plana 5.0 (рис. 2.7), которая позволяет измерить размерные показатели тела регенеранта  $S$  и регенерационной почки (бластемы)  $s$ .

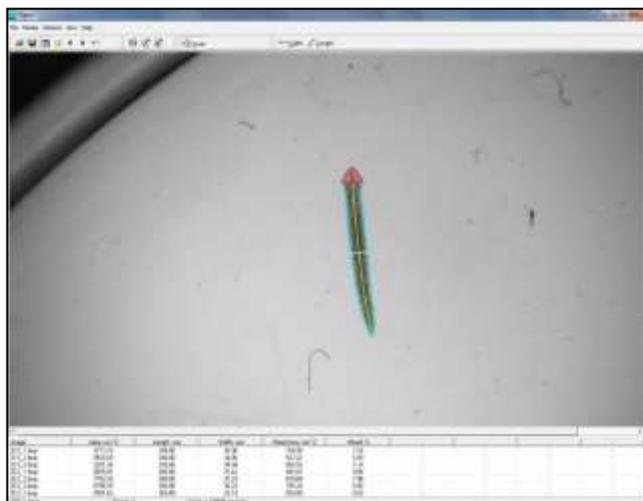


Рис. 2.7 Интерфейс ПО Plana 5.0

Программа Plana 5.0 имеет инструменты для автоматического оконтуривания изображения объекта и вычисления его размерных показателей (длина, ширина, площадь). Граница бластемы вводится оператором вручную с помощью отрезков прямых линий. В качестве количественного критерия образования бластемы использован коэффициент регенерации:

$$R = \frac{S_h}{S} \dots \dots \dots (2.1)$$

где  $S_h$  – площадь проекции бластемы головной части,

$S$  – площадь проекции регенерирующего фрагмента.

### 3. Результаты и обсуждения

#### 3.1 Анализ динамики ССФЭ при регенерации и фагоцитозе.

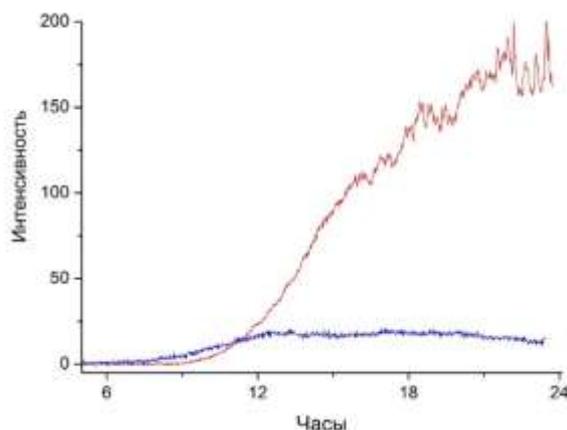


Рис. 3.1 Динамика уровня ССФЭ при регенерации и фагоцитозе (интенсивность в имп/сек.). Синяя линия - уровень ССФЭ при регенерации (однократная перерезка), красная линия - уровень ССФЭ при пищеварении.

По рисунку 3.1 видно, что при регенерации при однократной перерезке зафиксирован уровень ССФЭ около 20 имп/сек, тогда как при фагоцитозе он достигает 200 имп/сек., что в 10 раз сильнее. Это объясняется тем, что клеток, участвующих в процессе фагоцитоза, в несколько раз больше, чем максимум необластов, включенных в пролиферацию. Все клетки планарии, кроме нервных, участвуют в фагоцитозе. Также в фагоцитозе не участвуют половые клетки, но мы работаем с бесполой расой планарий, лишенной гамет.

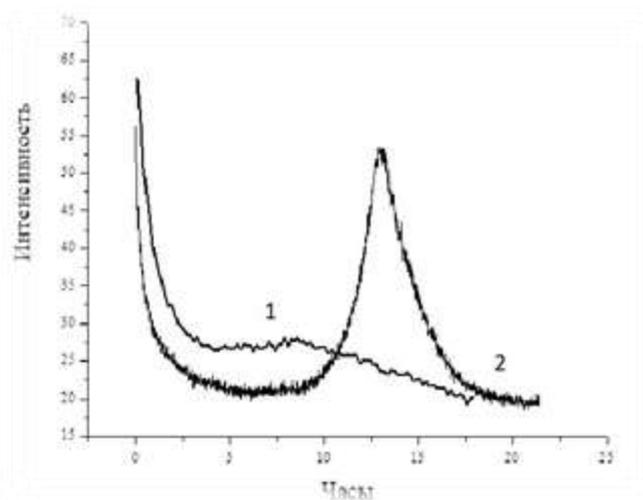
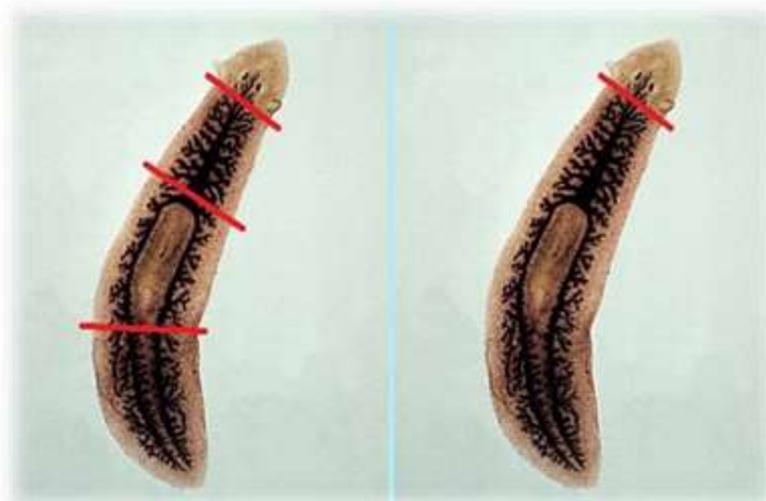


Рис. 3.2 Динамика ССФЭ при регенерации:

- 1 - ССФЭ при однократной перерезке (две раневые поверхности)
- 2 - ССФЭ при троекратной перерезке (шесть раневых поверхностей) (рис.3.3).

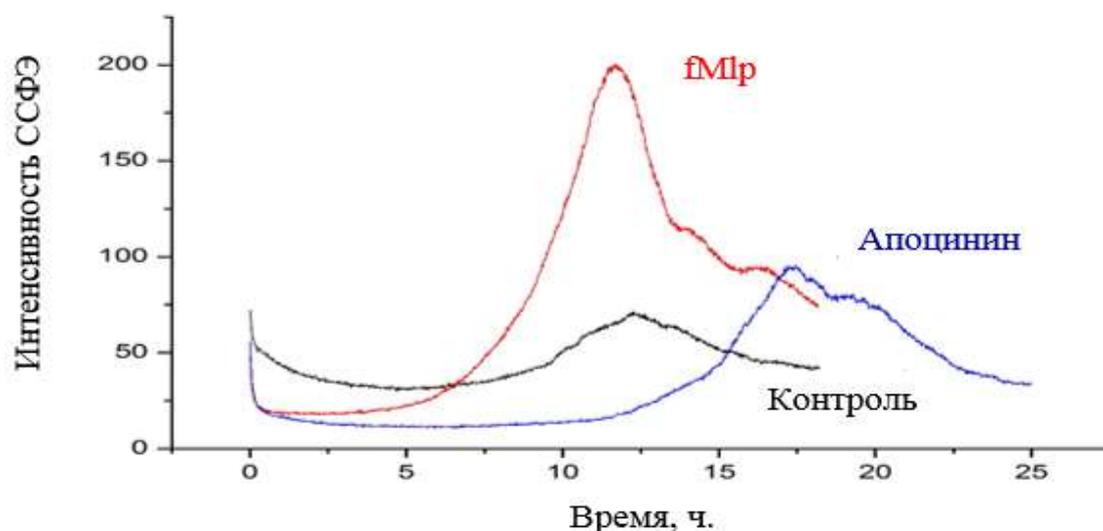


**Рис. 3.3 Схема проведения операции на планариях**

Анализ динамики ССФЭ при одно- и многократной перерезке показал, что при многократной перерезке уровень хемилюминесценции почти в три раза выше, чем при однократной, что позволяет судить о соотношении числа неoblа-стов, участвующих в пролиферации в обоих случаях.

### **3.2 Анализ динамики ССФЭ при регенерации**

Рис. 3.4 отражает динамику сверхслабого свечения под влиянием стимулятора хемилюминесценции (пептид FMLP) и ингибитора (апоциннин).



**Рис. 3.4 Динамика ССФЭ при регенерации под действием пептида FMLP и апоциннина**

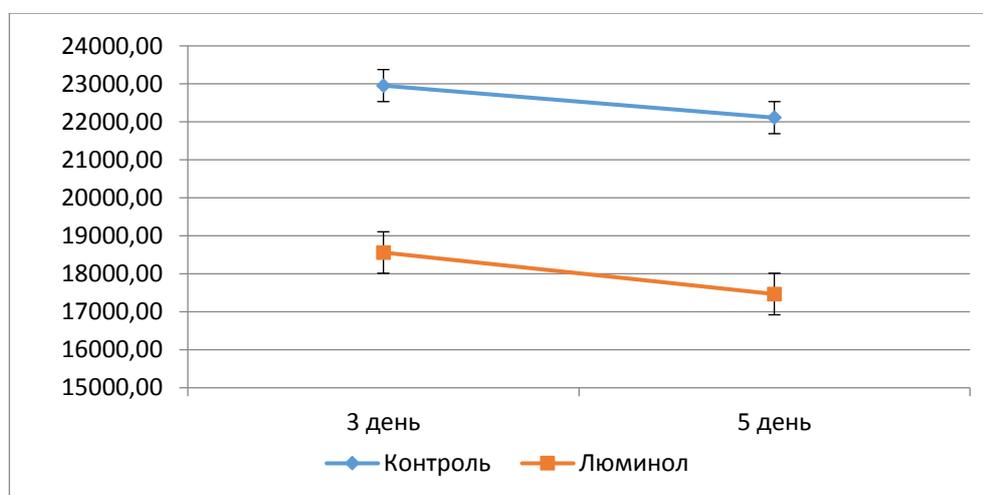
**Таблица 3.1 Регистрация ССФЭ при регенерации**

	Площадь пика	Время релаксации, час
Пептид fMLP	974,07	0,107
Апоцинин	547,52	0,334
Контроль	205,12	1,250

Как следует из рисунка 3.4, пептид fMLP очень сильно стимулировал сверхслабую фотонную эмиссию, (по сравнению с контролем), а апоцинин также стимулировал ССФЭ, но менее сильно. Эффект апоцинина проявился в том, что он отдалил во времени пик пролиферации на 5 часов. Но, вопреки ожиданиям, апоцинин не подействовал как ингибитор, а оказал, хоть и слабое, но стимулирующее воздействие.

### **3.3 Анализ динамики размерных показателей при регенерации**

Рисунки 3.5-3.9 отражают динамику размерных показателей тела регенерирующих планарий под воздействием люминола.



**Рис. 3.5 Динамика площади тела регенерирующих планарий**

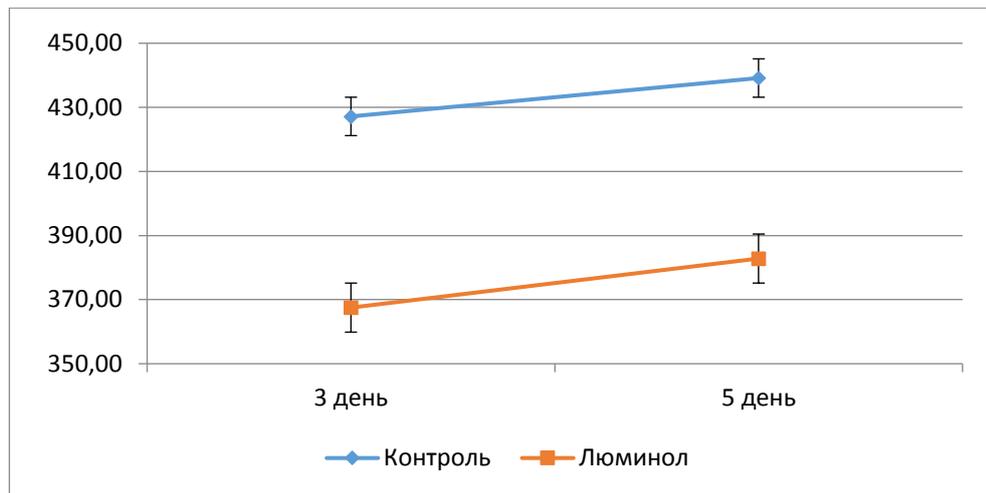


Рис. 3.6 Динамика длины тела регенерирующих планарий

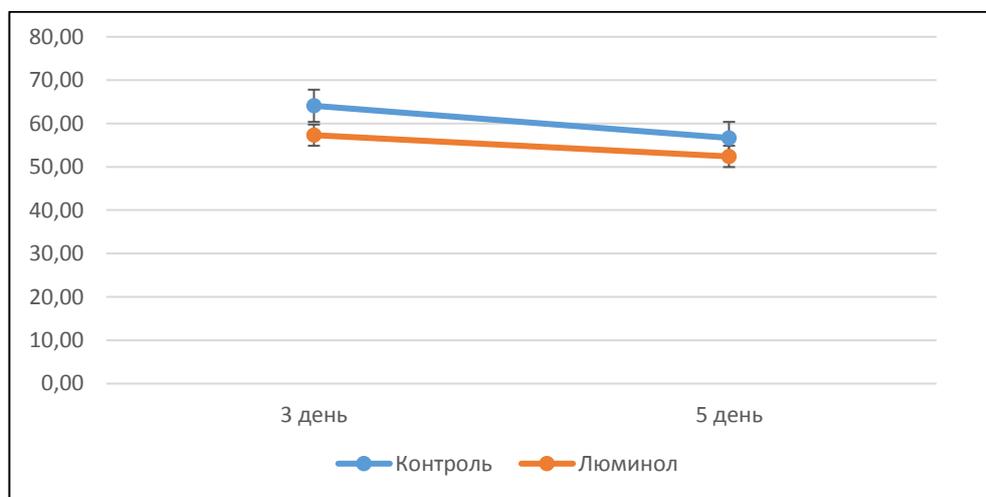


Рис. 3.7 Динамика ширины тела регенерирующих планарий

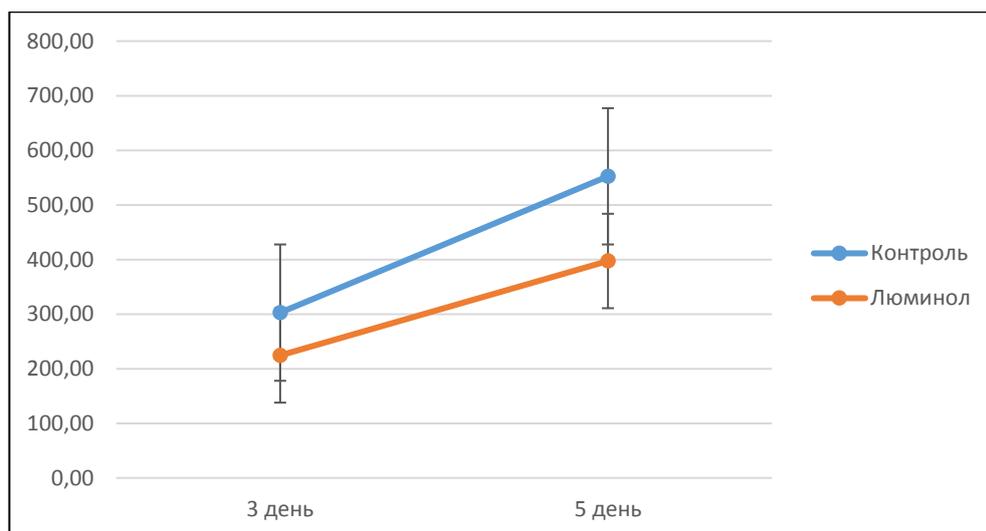
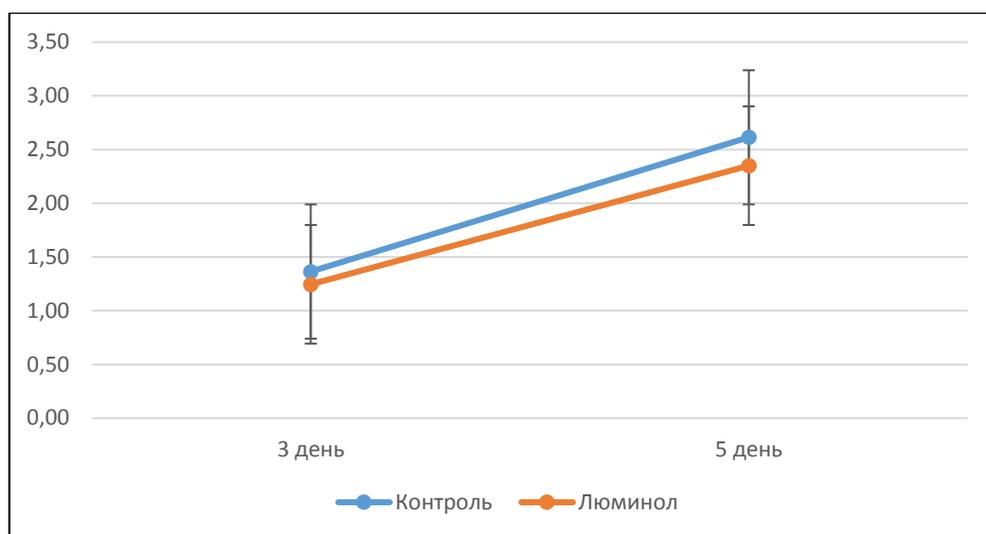


Рис. 3.8 Динамика площади бластемы регенерирующих планарий



**Рис. 3.9 Динамика индекса регенерации планарий**

Рисунки 3.5-3.9 показывают, что под воздействием люминола регенерация в целом замедлилась, т. е. данное вещество оказало ингибирующее воздействие. Причем рост индекса регенерации (рис. 3.9) в основном был обусловлен увеличением площади бластемы: по рис. 3.6 видно, что длина тела планарий в процессе эксперимента увеличилась незначительно, а ширина уменьшилась (рис. 3.7).

### **3.4 Анализ динамики морфометрических показателей при регенерации планарий под действием разных концентраций пептида FMLP**

Таблицы 3.3 - 3.7 и рисунки 3.10-3.14 отражают данные эксперимента по регенерации планарий под действием разных концентраций пептида FMLP.

**Таблица 3.3 Динамика площади тела регенерирующих планарий**

Area, мм <sup>2</sup>	3 день	5 день	7 день	Прирост, %
10-9	81099,78	76632,07	76763,36	-5,35
10-11	82128,74	80096,24	76874,74	-6,40
10-13	60348,58	58275,90	58896,81	-2,41
Контроль	86036,01	82496,04	76496,83	-11,09

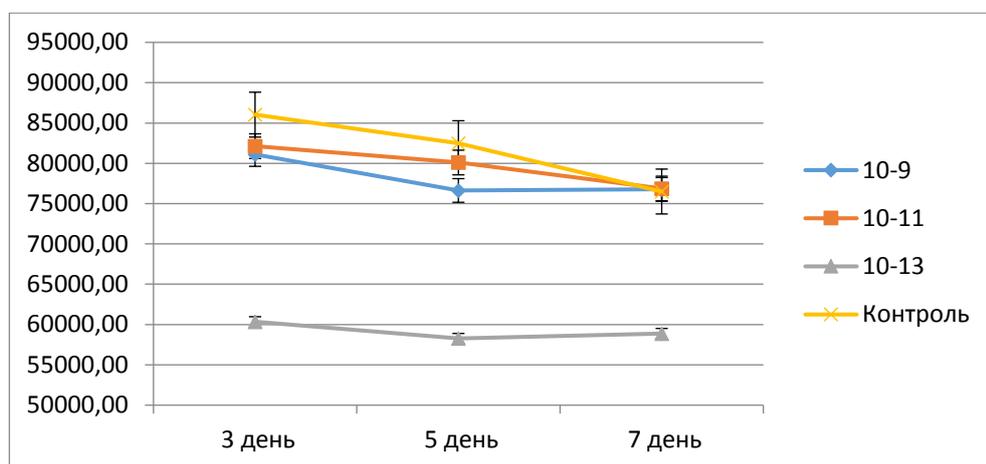


Рис. 3.10 **Динамика площади тела регенерирующих планарий**

Стимулирующий эффект пептида на восстановлении площади тела планарий проявился в снижении ее отрицательного роста, причем у раствора пептида меньшей концентрации это действие проявилось в большей степени (рис. 3.10).

Табл. 3.4 **Динамика длины тела регенерирующих планарий**

Length, мм	3 день	5 день	7 день	Прирост, %
10-9	834,52	865,05	899,38	7,8
10-11	874,67	923,43	901,25	3
10-13	708,86	755,45	776,37	9,5
Контроль	904,19	886,00	879,45	-2,8

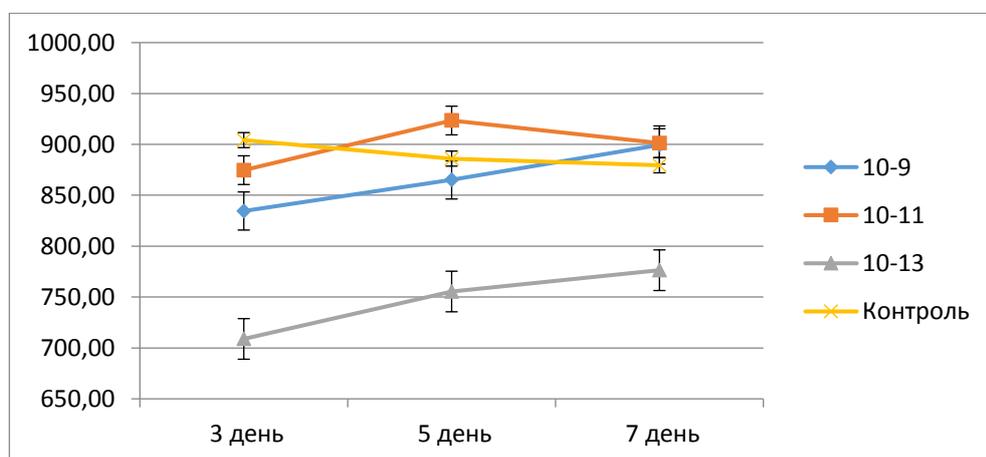


Рис. 3.11 **Динамика длины тела регенерирующих планарий**

В контрольной группе планарий зарегистрирован отрицательный рост длины тела животных, тогда как пептид в концентрациях  $10^{-9}$ ,  $10^{-11}$ ,  $10^{-13}$  вызвал стимуляцию регенерации: 7,8, 3 и 9,5% соответственно (табл. 3.4, рис. 3.11).

Таблица 3.5 Динамика ширины тела регенерирующих планарий

Width, мм	3 день	5 день	7 день	Прирост, %
10-9	120,53	106,07	99,85	-17,16
10-11	110,66	98,15	100,85	-8,86
10-13	96,76	87,97	88,24	-8,81
Контроль	110,63	104,05	100,99	-8,71

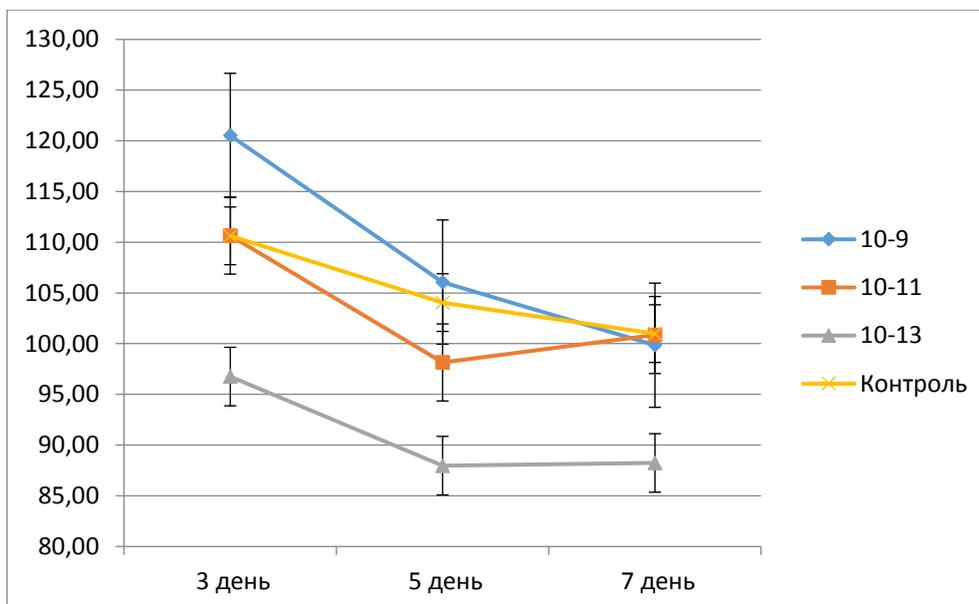
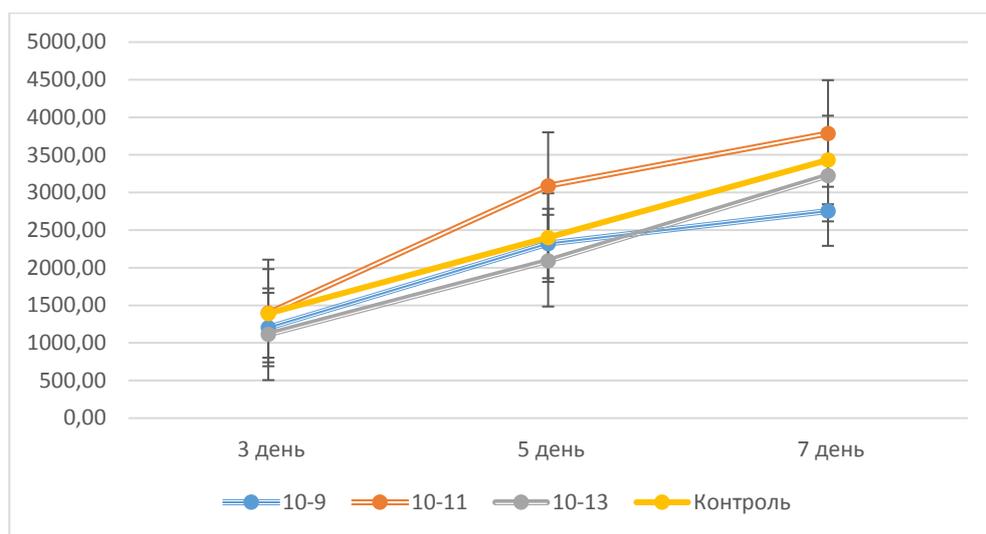


Рис. 3.12 Динамика ширины тела регенерирующих планарий

Такое же воздействие, как и на площадь тела планарий, оказал пептид и на ширину тела животных. Т.е., вероятно, динамика площади их тела в большей степени обусловлена динамикой ширины (табл. 3.5, рис. 3.12).

Табл. 3.6 Динамика площади бластемы регенерирующих планарий

Head Area, мм <sup>1</sup>	3 день	5 день	7 день	Прирост, %
10-9	1203,43	2322,19	2752,92	128,76
10-11	1398,63	3091,52	3785,04	170,62
10-13	1115,23	2093,72	3226,13	189,28
Контроль	1392,36	2400,41	3432,57	146,53

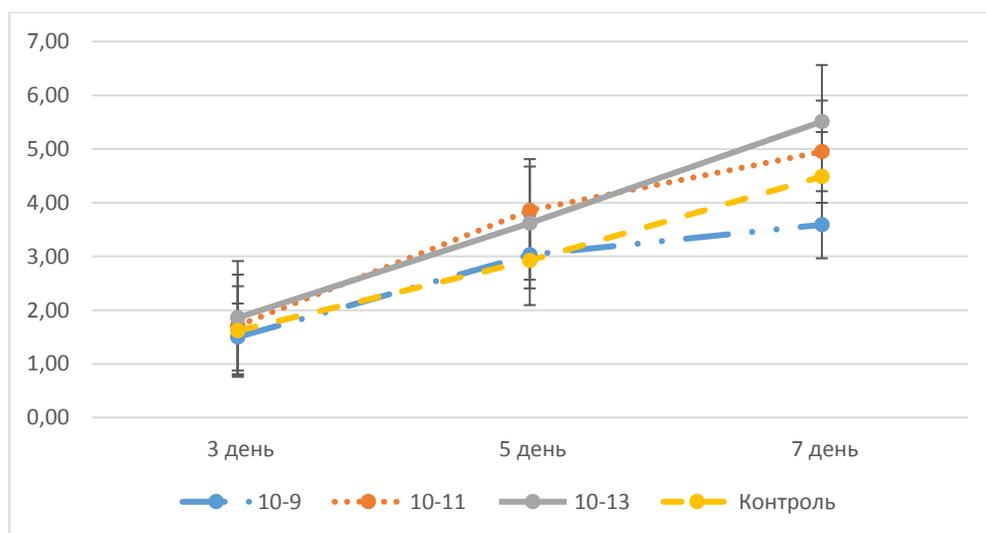


**Рис. 3.13** Динамика площади бластемы регенерирующих планарий

Площадь бластемы планарий, регенерирующих под воздействием пептида, увеличилась в большей степени, чем в контрольной группе, причем и в этом случае сила стимулирующего эффекта была обратно пропорциональна концентрации стимулятора (табл. 3.6, рис. 3.12).

**Табл. 3.7** Динамика индекса регенерации планарий

гHead, %	3 день	5 день	7 день
10-9	1,50	3,03	3,59
10-11	1,71	3,86	4,95
10-13	1,86	3,62	5,51
Контроль	1,62	2,92	4,49



**Рис. 3.14** Динамика индекса регенерации планарий

Таким образом, индекс регенерации планарий под воздействием пептида в концентрации  $10^{-13}$  М/л выше, чем в  $10^{-11}$  М/л и в контрольной группе. Интересно, что пептид в концентрации  $10^{-9}$  оказал слабое тормозящее воздействие (см. также табл. 3.6 и рис. 3.13).

### 3.5 Микроспектрофотометрическое исследование спектральных характеристик фагоцитирующих планарий

На рис. 3.15 отражены спектры поглощения белков группы гемоглобинов.



Рис. 3.15 Спектральные характеристики белков группы гемоглобинов

Графики показывают длины волн: оксигемоглобин – 570,58 нм, метгемоглобин – 640,00 нм.

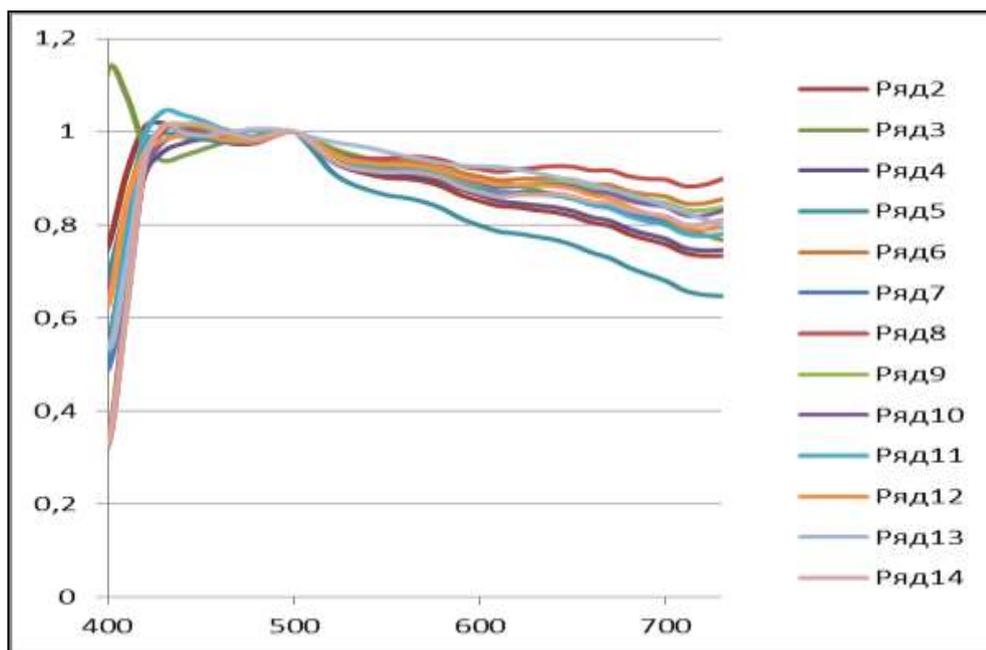


Рис. 3.16 Спектрограмма голодных планарий

На рисунке 3.16, характеризующем спектрограмму планарий до кормления, четко выражена область поглощения при 500 нм, слабо выражены области при 570 нм и 640 нм.

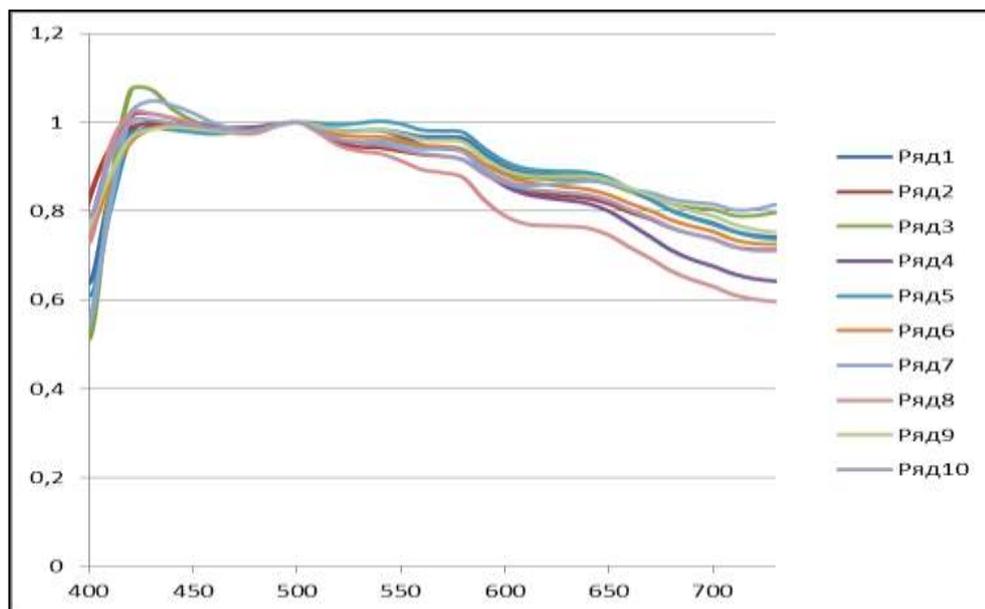


Рис. 3.17 Спектрограмма планарий через 5 ч. после кормления

На рисунке 3.17, отражающем спектральные характеристики планарий через 5 час после кормления, более четко видны пики при 540, 580 и 640 нм.

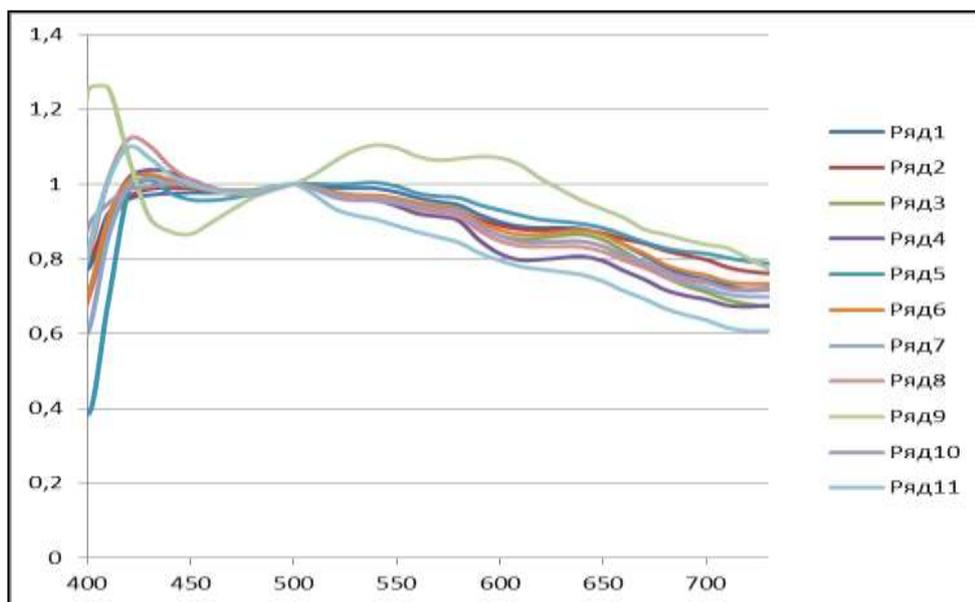


Рис. 3.18 Спектрограмма планарий через 24 ч. после кормления

Как видно по рисунку 3.18, выражен пик при 500 нм, также видны полосы при 540, 580, 640 нм, что совпадает со спектрами гемоглобинов.

Табл. 3.8 Характеристики значимости различия групп

	Голодные	Через 48 ч после кормления	Через 24 ч после кормления	В день кормления
Объем выборки	13	11	10	9
Среднее	1,068035	1,139252977	1,140739506	1,18612322
Стандартное отклонение	0,030925	0,031923758	0,039411048	0,04459994
Доверительный интервал (P = 0.95)	0,018687	0,021446673	0,028192966	0,034282549
Среднее ± доверительный интервал (P = 0.95)	1,07 ± 0,02	1,14 ± 0,02	1,14 ± 0,03	1,19 ± 0,03
Статистика Стьюдента для средних	5,539392		2,355532926	
Вероятность	0,999986		0,96923424	

В табл. 3.8 приведены статистической обработки данных эксперимента по микроспектрофотометрическому исследованию фагоцитирующих планарий. Статистика Стьюдента для средних показывает, что результаты эксперимента статистически надежны.

### 3.5 Цветометрический анализ влияния температуры на фагоцитоз

Цветометрический анализ послужил инструментом изучения фагоцитоза планарий в разных температурных режимах (рис. 3.19-3.43). Динамика цветовых характеристик поверхности тела планарий оказалась идентична предполагаемой зависимости интенсивности фагоцитоза в разных температурных режимах.

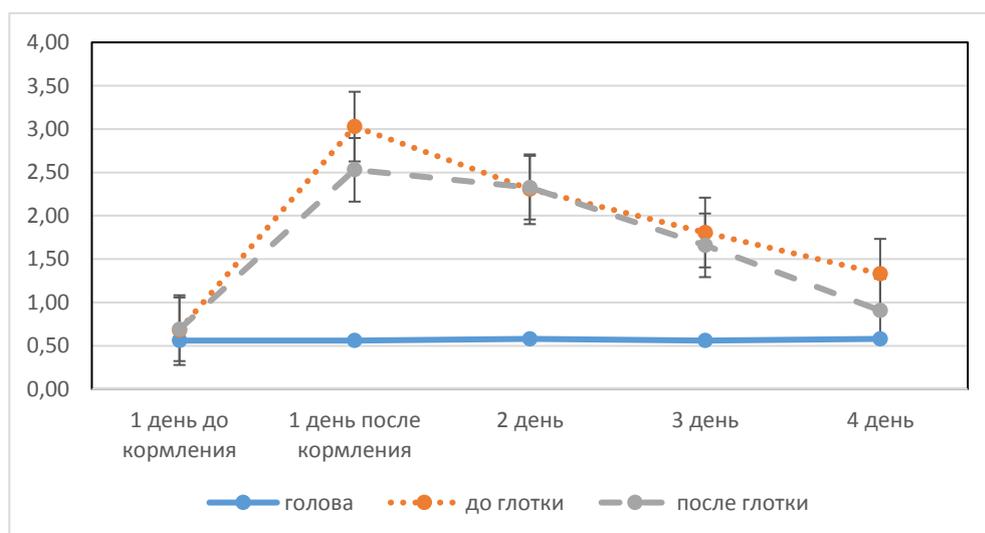


Рис. 3.19 Динамика теплоты цвета при фагоцитозе (23°C)

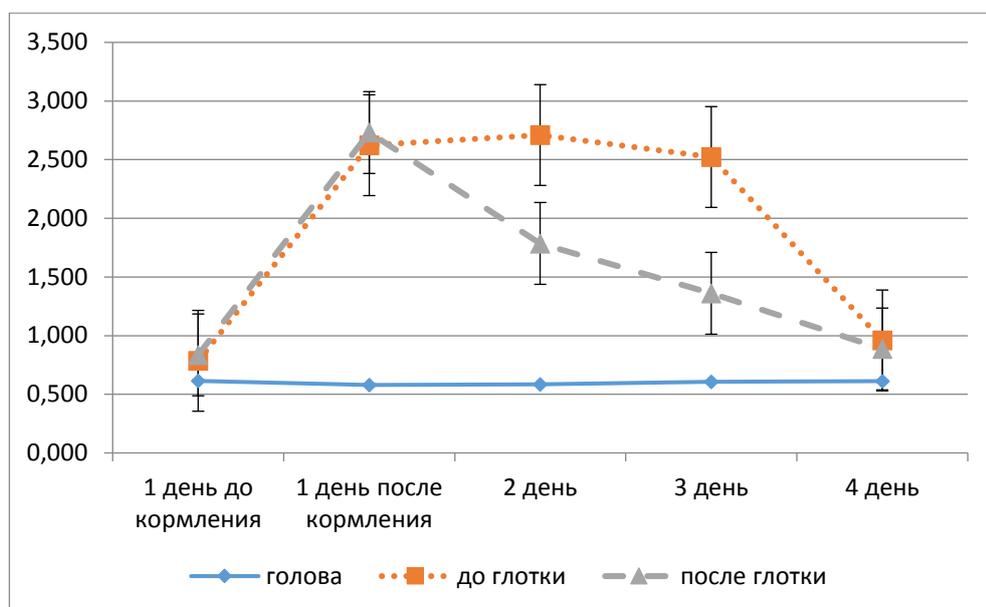


Рис. 3.20 Динамика теплоты цвета при фагоцитозе (26°C)

Так, величина теплоты цвета в области головы при 23° и при 26° не менялась (рис. 3.19 - 3.20). Это объясняется тем, что головной конец планарий преимущественно занят нервными клетками, которые в процессе фагоцитоза не участвуют. в доглоточной области сразу кормления показатель теплоты увеличился, но при 26°C на следующий день его рост продолжился, тогда как при 23°C его величина начала снижаться. Также на третий и четвертый день наблюдений снижение теплоты цвета было зафиксировано и в заглочочной области.

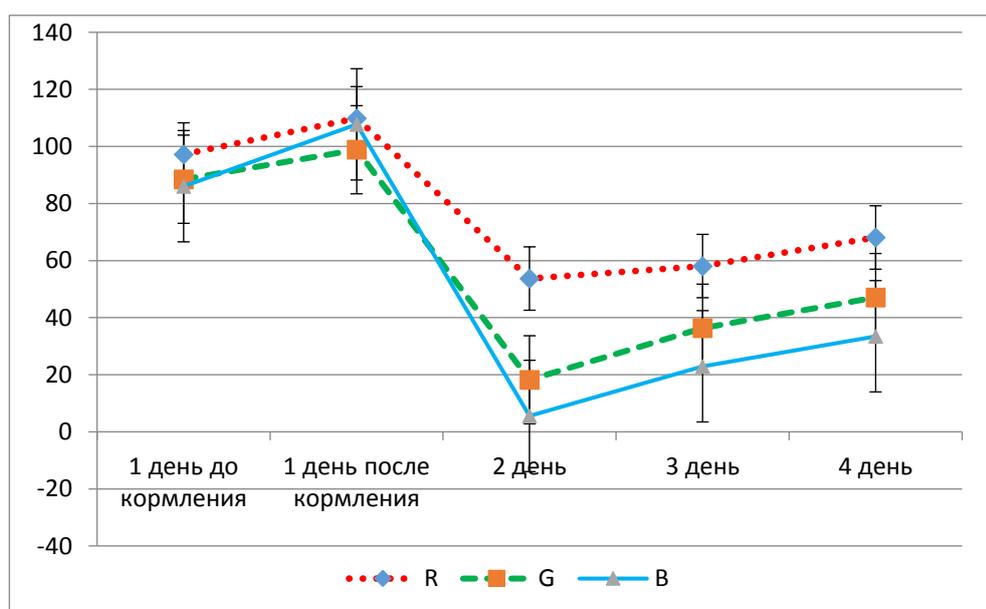


Рис. 3.21 Динамика абсолютных величин цвета головы при фагоцитозе (23°C)

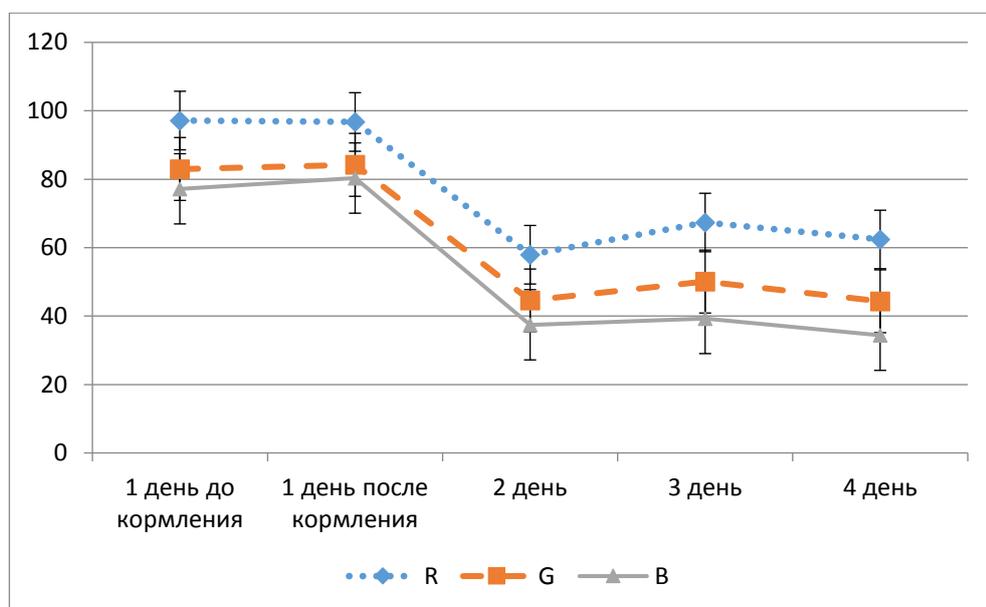


Рис. 3.22 Динамика абсолютных величин цвета головы при фагоцитозе (26°C)

Величины показателей основных цветов сразу после кормления увеличились, а ко второму дню эксперимента опять начали расти (рис. 3.21 - 3.22). Влияние температуры проявилось в том, что при 26°C снижение второго дня и последующий рост было не таким значительным, как при 23°C. В целом колебания величины цветов при 26°C были менее выражены, чем при 23°C.

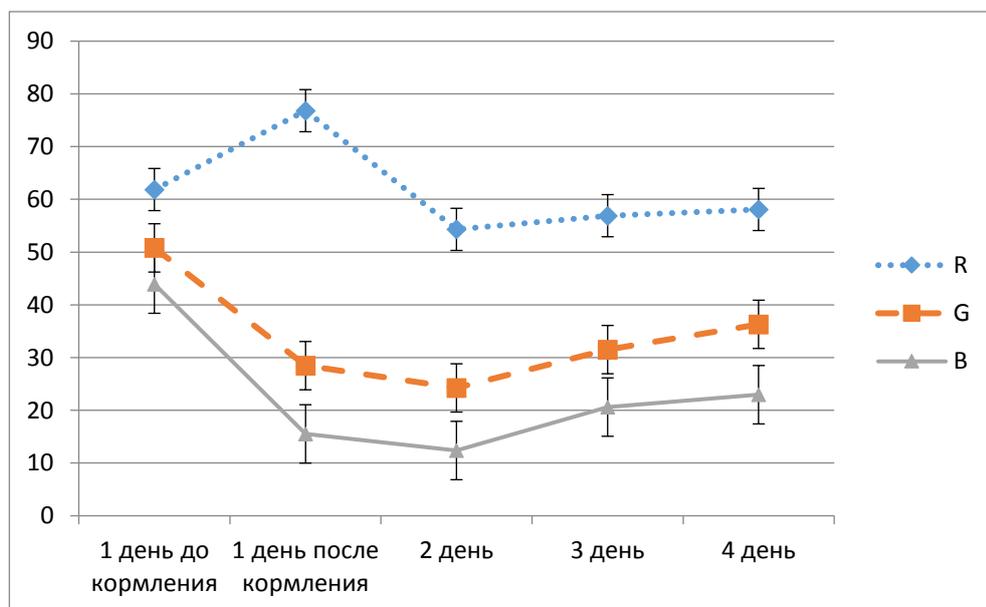


Рис. 3.23 Динамика абсолютных величин цвета предглоточной области при фагоцитозе (23°C)

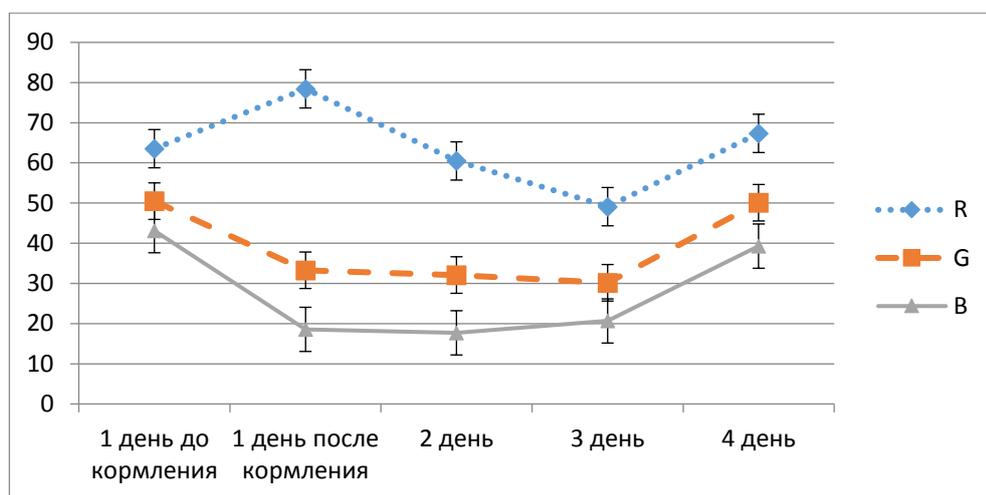


Рис. 3.24 **Динамика абсолютных величин цвета предглоточной области при фагоцитозе (26°C)**

Также и на динамику абсолютных величин цвета в предглоточной области высокая температура оказала сглаживающее влияние, так как при 26°C фагоцитоз протекал более интенсивно, без снижений активности (рис. 3.23 - 3.24). Снижение величины красного цвета при 23°C произошло уже во второй день после кормления и далее мзменялось мало, а при 26°C - к третьему дню наблюдений и далее последовал значительный рост. Величины синего и зеленого цветов в обоих температурных режимах снизились сразу после кормления, с началом фагоцитоза, затем, к четвертому дню, вновь выросли: при 23°C - незначительно, а при 26°C - практически до первоначальных величин.

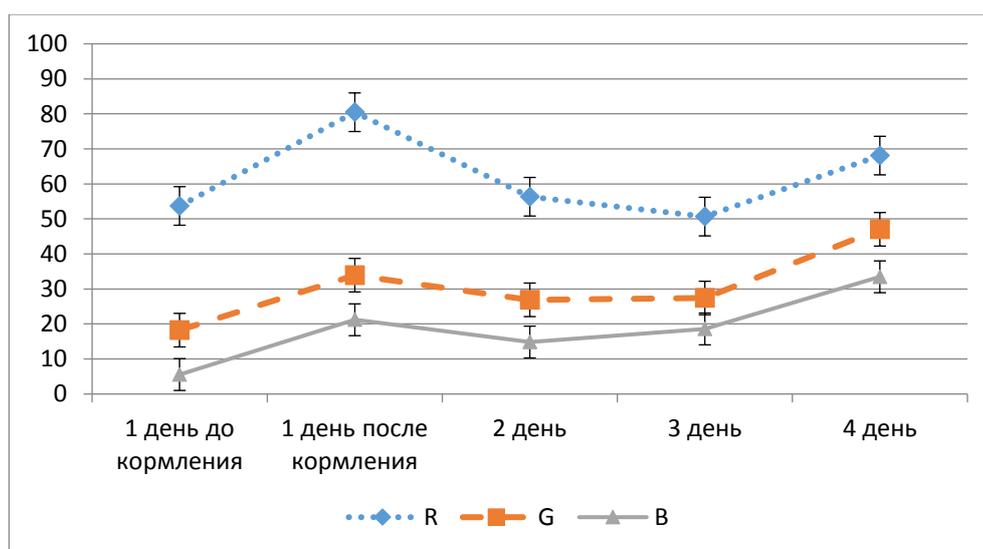


Рис. 3.25 **Динамика абсолютных величин цвета заглоточной области при фагоцитозе (23°C)**

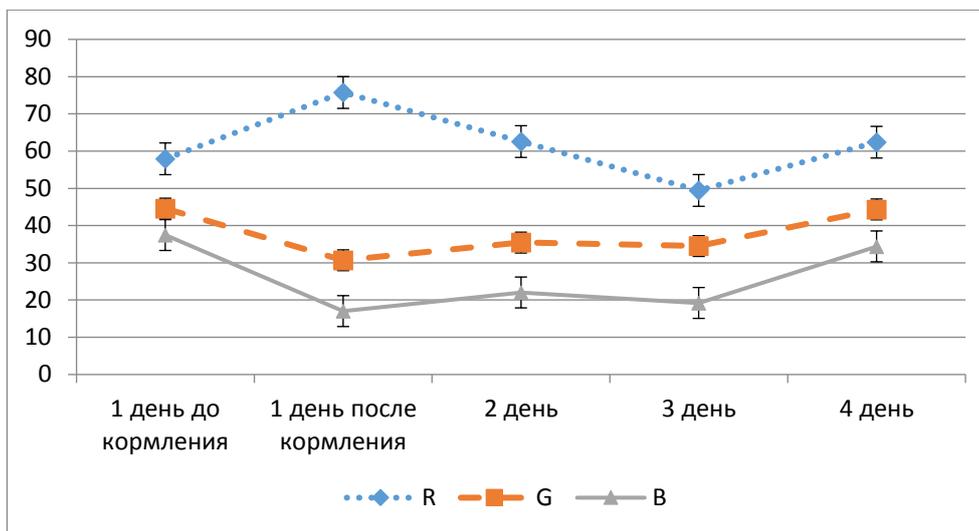


Рис. 3.26 Динамика абсолютных величин цвета заглоточной области при фагоцитозе (26°C)

Величина красного цвета в заглоточной области при 23°C и при 26°C (рис. 3.25 - 3.26) сразу после кормления выросла, затем к третьему дню достигла минимума и далее снова увеличилась. Аналогичной была динамика синего и зеленого цветов при 23°C, тогда как при 26°C величины синего и зеленого цветов сразу после кормления претерпели снижение и не менялись до третьего дня, пока шел активный фагоцитоз, а к четвертому дню увеличились - также до первоначальных величин. Надо отметить, что к четвертому дню величины всех цветов при 26°C достигли первоначальных значений, а при 23°C их превысили.

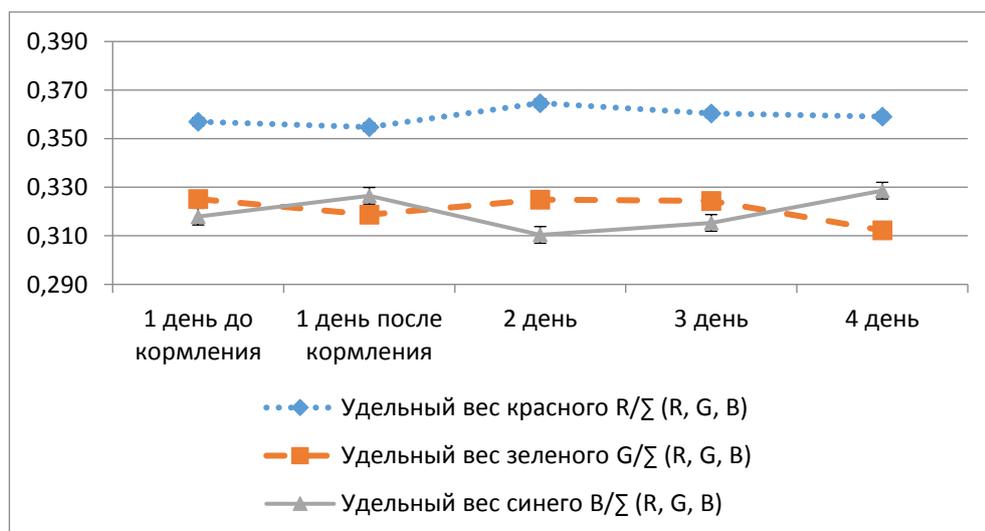


Рис. 3.27 Динамика относительных величин цвета головы планарий при фагоцитозе (23°C)

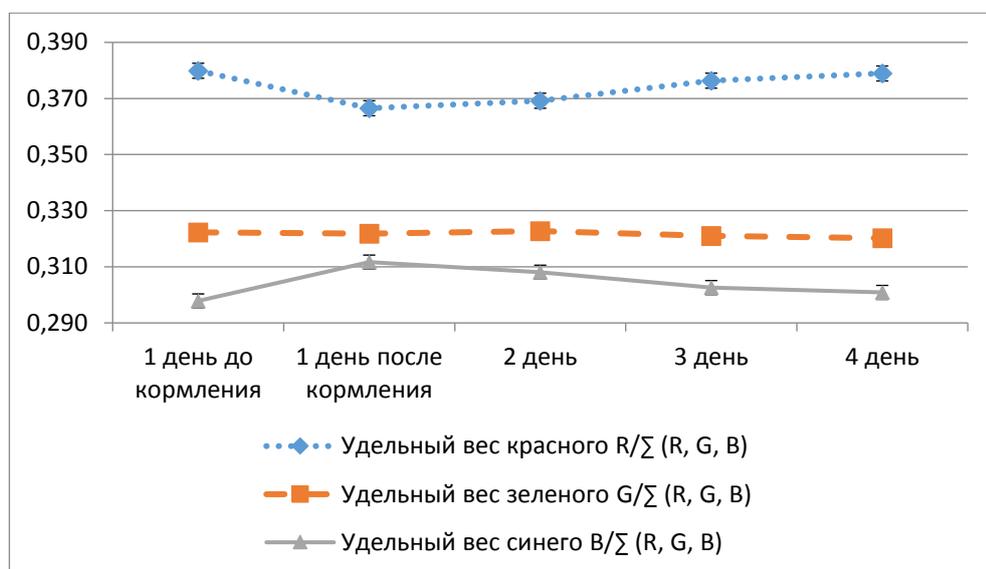


Рис. 3.28 **Динамика относительных величин цвета головы планарий при фагоцитозе (26°C)**

Величина красного цвета поверхности головы (рис. 3.27 - 3.28) сразу после кормления в обоих температурных режимах снизилась (при 26°C - сильнее), затем росла, но при 23°C превысила первоначальные показатели уже во второй день после кормления; тогда как рост показателя при 26°C был более плавным, и его величина сравнялась с первоначальным значением лишь к четвертому дню наблюдений. Динамика зеленого цвета при 23°C и при 26°C была аналогичной динамике красного цвета. А зеленый цвет в обоих температурных режимах оставлся неизменным (при 23°C немного снизился к 4-му дню),

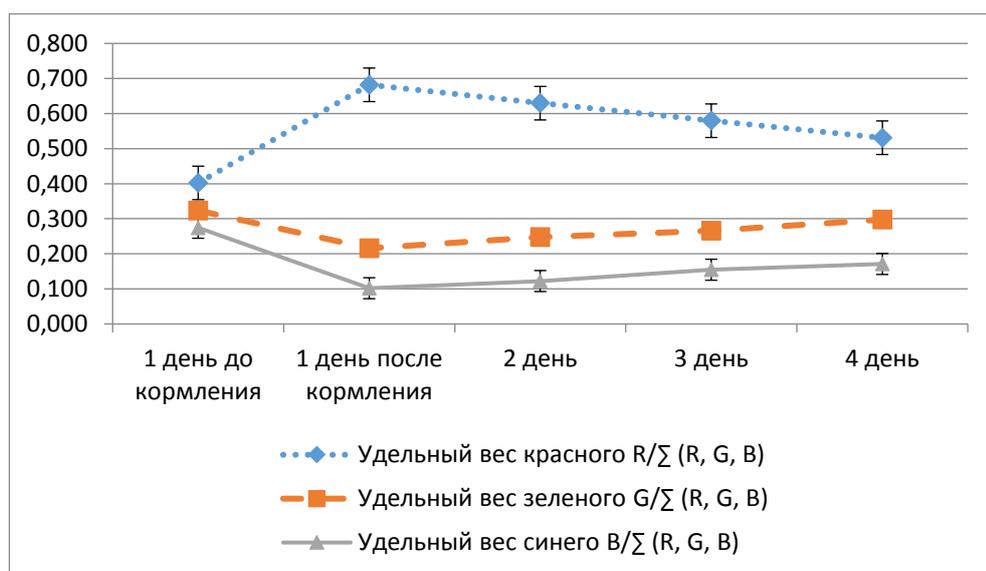


Рис. 3.29 **Динамика относительных величин цвета предглоточной области при фагоцитозе (23°C)**

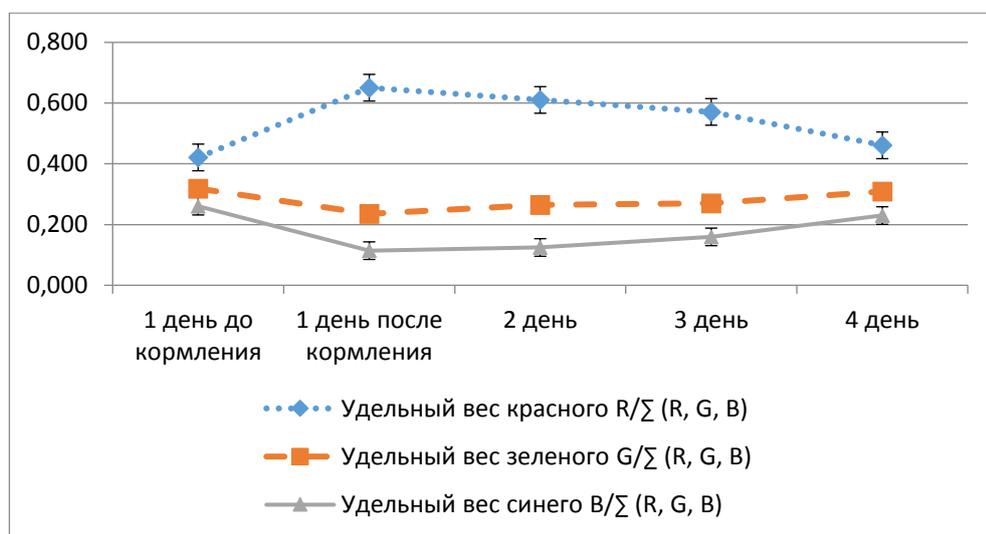


Рис. 3.30 **Динамика относительных величин цвета предглоточной области при фагоцитозе (26°C)**

Изменение величин основных цветов (рис. 3.29 - 3.30) при 23°C и при 26°C происходило одинаково, отличаясь лишь выраженностью: сразу после кормления показатель красного цвета вырос, а затем снижался; при 26°C достигнув первоначальных величин к 4-му дню, в отличие от режима 23°C, - в последнем случае снижение показателя шло более медленными темпами. зеленый цвет в обеих группах животных сразу после кормления немного снизился и вернулся к первоначальным показателям к 4-му дню. Величина синего цвета в обеих группах также претерпела снижение после кормления (при 26°C - более сильное), а затем начала расти, не достигнув первоначальных величин во время наблюдения.

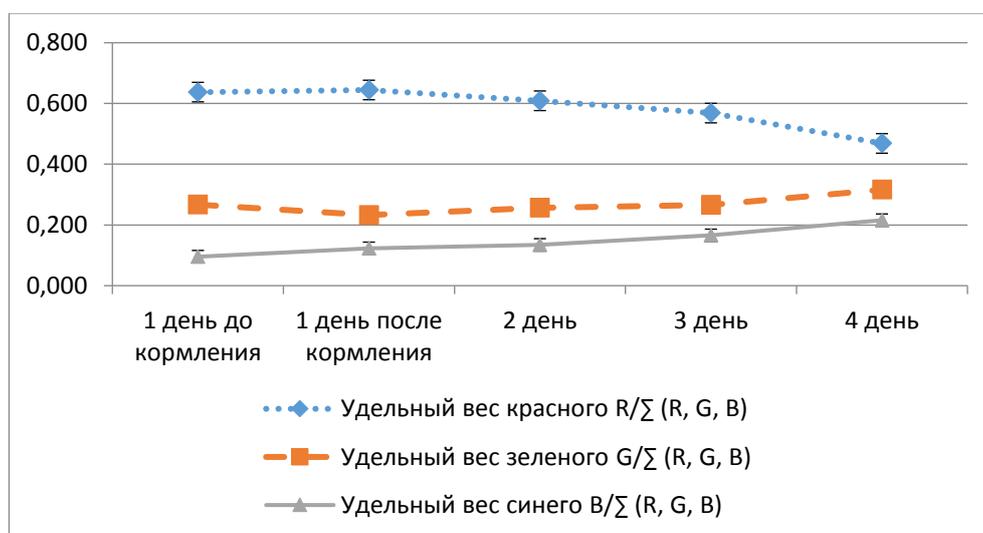


Рис. 3.31 **Динамика относительных величин цвета заглочной области при фагоцитозе (23°C)**

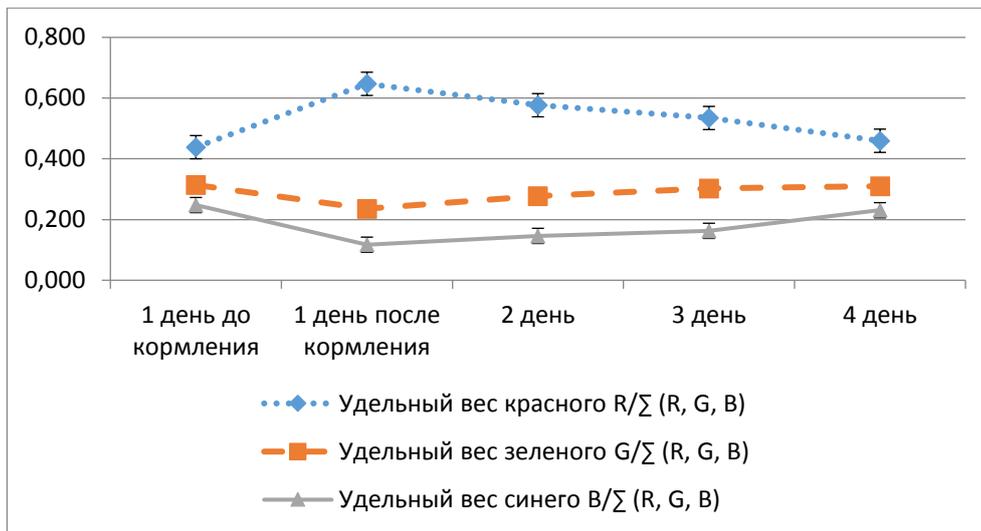


Рис. 3.32 **Динамика относительных величин цвета заглоточной области при фагоцитозе (26°C)**

Как видно из рис. 3.31-3.32, более активно протекающий фагоцитоз при 26°C отразился в более интенсивной динамике относительной величины красного цвета: если при 23°C его величина не изменялась, а к 4-му дню даже снизилась, то при 26°C показатель сразу после кормления вырос, затем постепенно снижался, достигнув к концу переваривания пищи (4-й день) первоначальных показателей. Относительный зеленый цвет не менялся в обеих группах, а синий цвет при 23°C после кормления начал медленно расти, увеличившись к 4-му дню примерно в 2 раза. При 26° сразу после кормления синий цвет снизил первоначальные показатели, вернувшись к ним на 4-й день наблюдений.

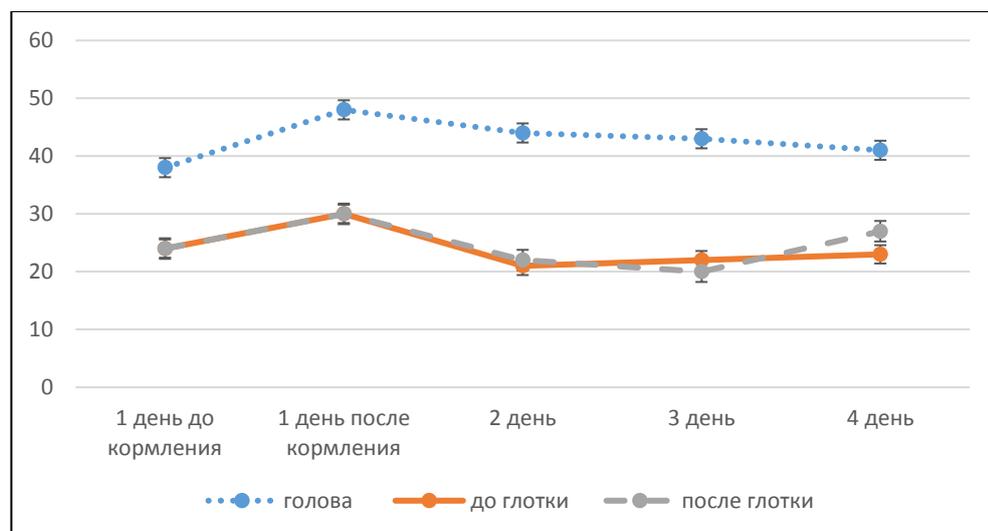


Рис. 3.33 **Динамика яркости цвета планарий при фагоцитозе (23°C)**

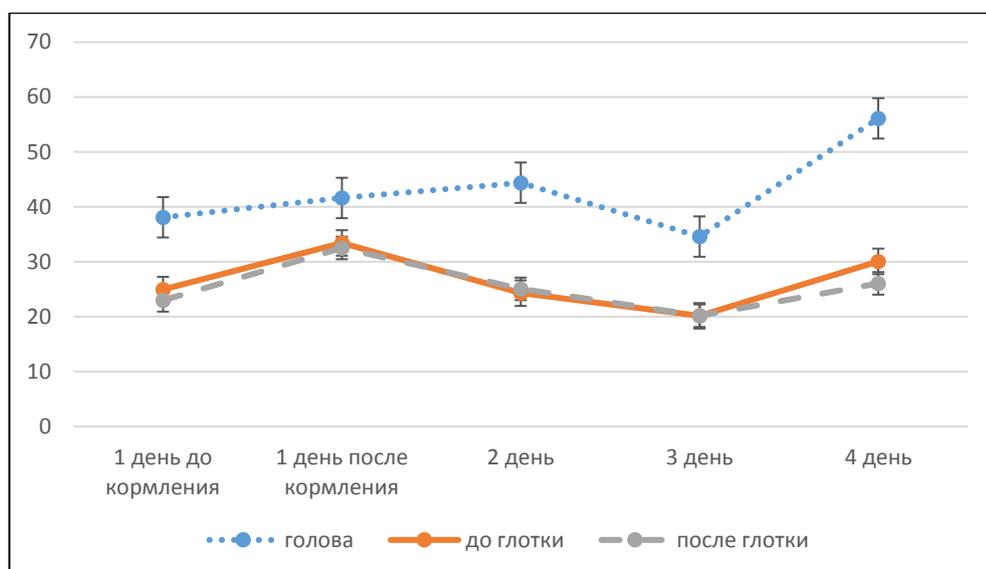


Рис. 3.34 Динамика яркости цвета планарий при фагоцитозе (26°C)

У планарий, фагоцитирующих при 23°C и при 26°C, зафиксирована (рис. 3.33 - 3.34) схожая динамика яркости поверхности тела в области глотки: сразу после кормления - увеличение, затем состояние плато либо незначительное снижение, затем вновь рост до первоначальных величин. Яркость головы планарий, фагоцитирующих при 23°C, увеличилась сразу после кормления, а при 26°C - лишь ко 2-му дню, затем показатель в обоих случаях снижался и при 23°C далее оставался неизменным, а при 26°C к 4-му дню сильно увеличился (почти в полтора раза), чему причина - питание клеток головы, не участвующих в непосредственном фагоцитозе гемолимфы мотыля.

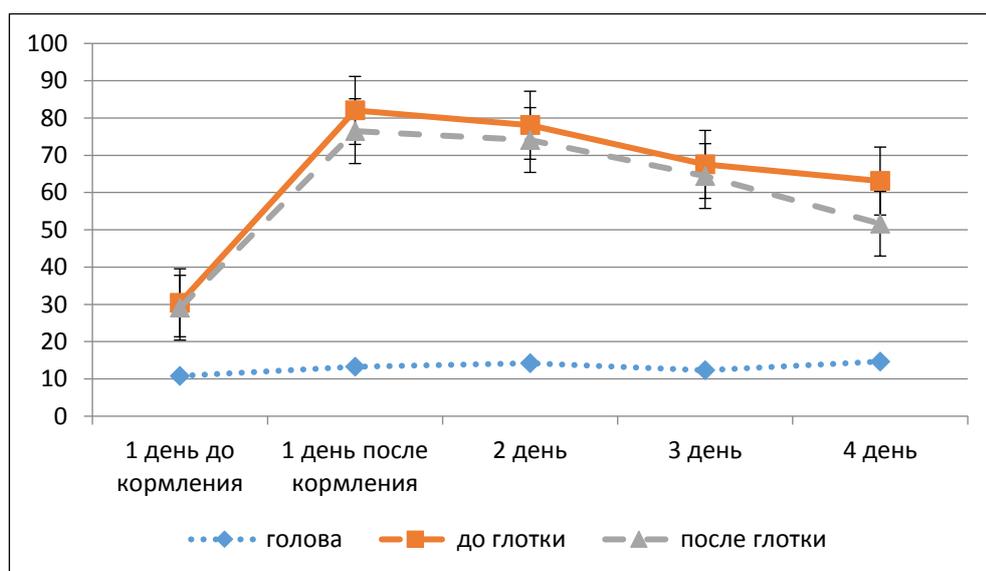


Рис. 3.35 Динамика насыщенности цвета планарий при фагоцитозе (23°C)

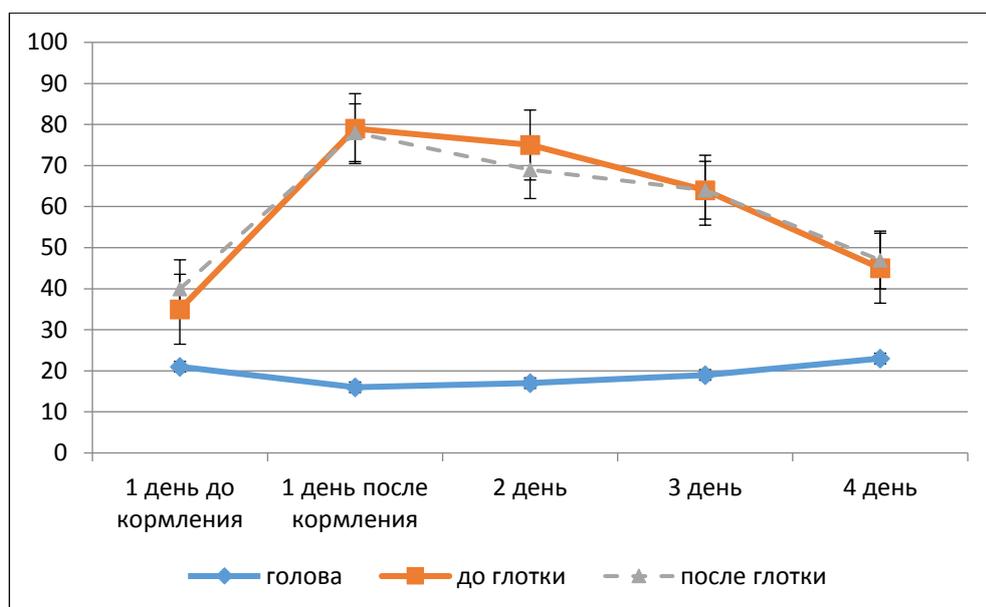


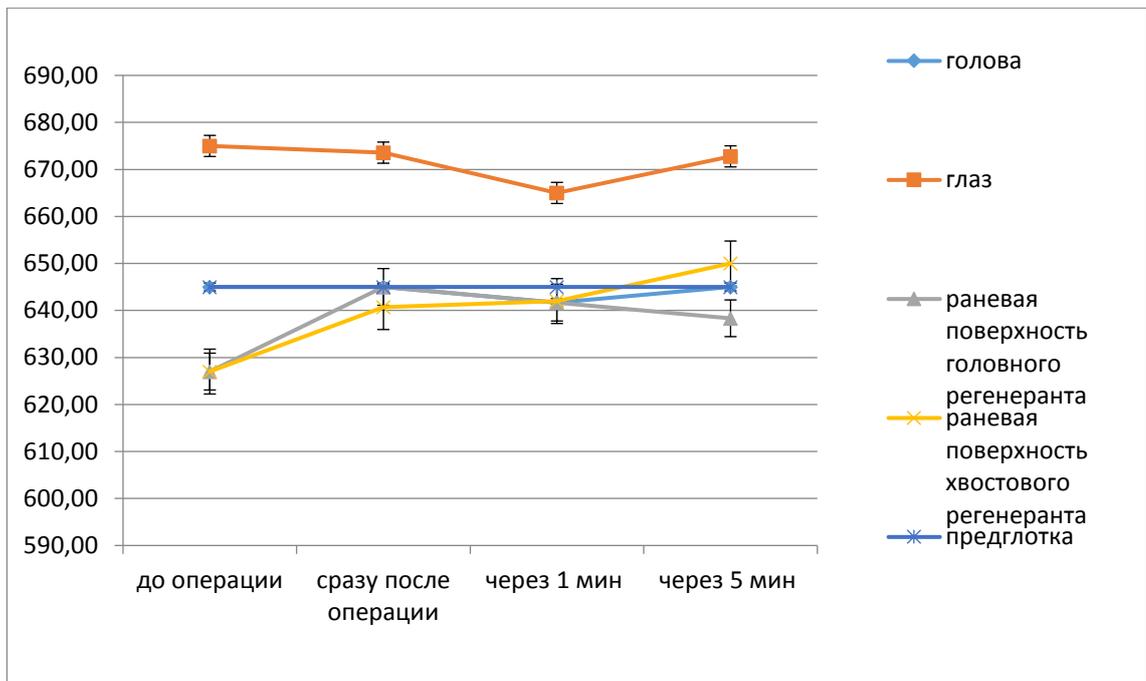
Рис. 3.36 **Динамика насыщенности цвета планарий при фагоцитозе (26°C)**

Показатель насыщенности в области головы и при 23°C, и при 26°C на протяжении эксперимента не изменялся. В отличие от него, в области глотки зафиксирована выраженная динамика: сразу после кормления, с началом фагоцитоза, показатель вырос в обоих случаях примерно в 2,5 раза, затем медленно снижался так, что при 23°C его уровень в 4-й день наблюдений превышал первоначальную величину более чем в 2 раза, а при 26°C - лишь на 34%, т.е при более высокой температуре показатель снижался быстрее, что указывает на более интенсивно протекающий фагоцитоз у животных.

### 3.7 Цветометрический анализ регенерации планарий

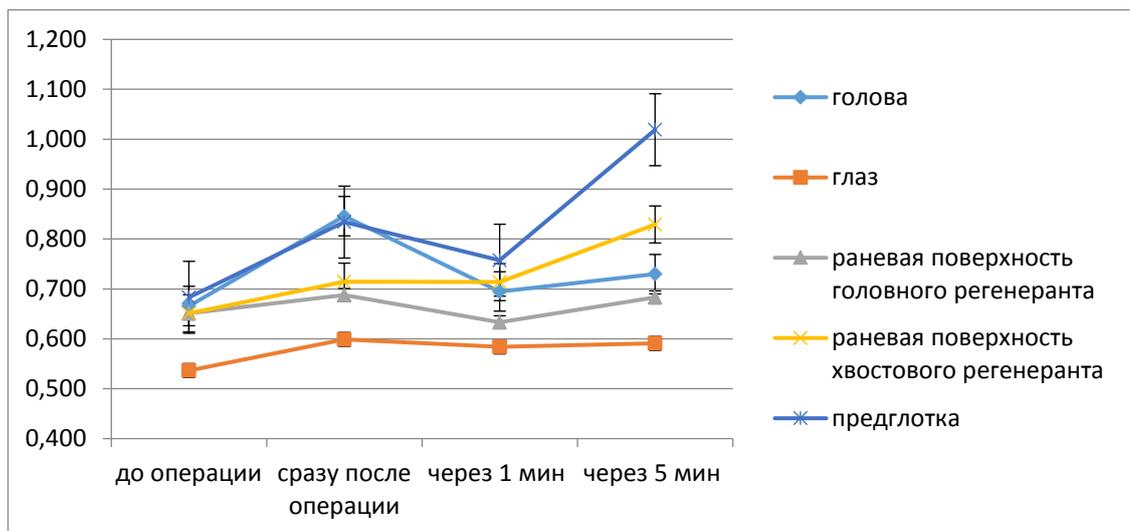
Цветометрическими методами была исследована быстрая реакция планарий на травму. Объектами анализа послужили такие цветометрические характеристики, как длина волны, теплота цвета тела животных, его насыщенность и яркость, а также абсолютные и относительные величины красного, зеленого и синего цветов.

Как видно из рисунка 3.37, сразу после операции изменилась длина волны раневой поверхности животных, затем, через 1 минуту, наблюдались колебания показателя в области глаз планарий.



**Рис. 3.37** Динамика длины волны при быстрой реакции на травму

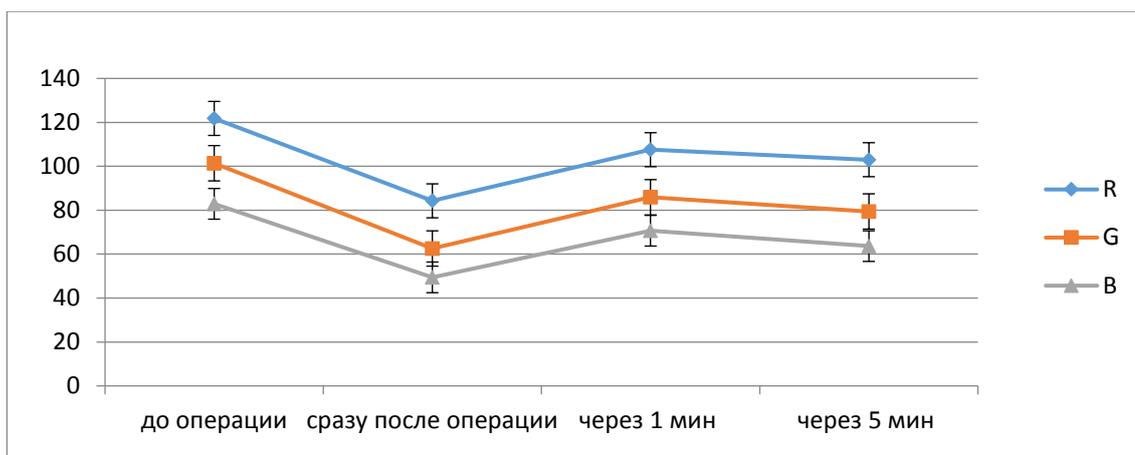
А в головном фрагменте тела, как в предглоточной области, изменений длины волны не практически не зафиксировано.



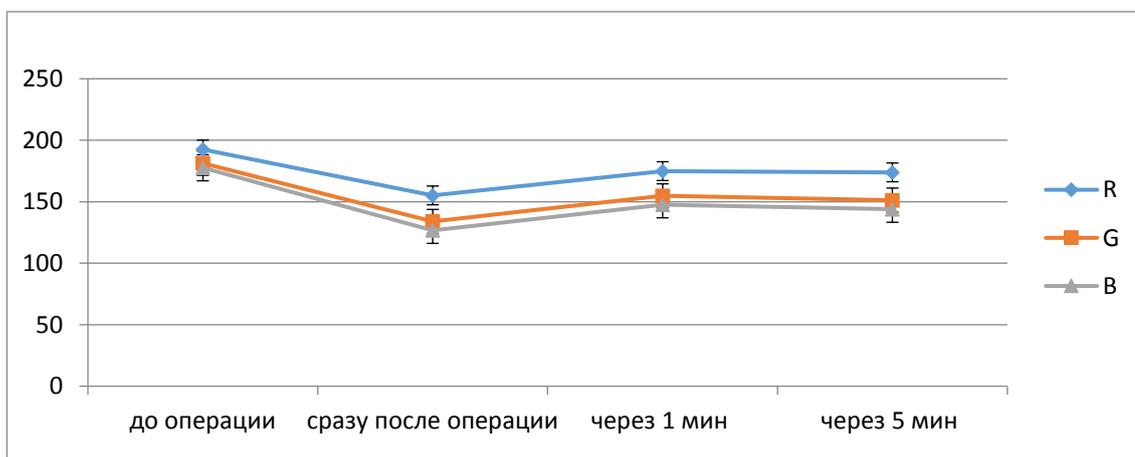
**Рис. 3.38** Динамика теплоты цвета при быстрой реакции на травму

Анализ динамики теплоты цвета тела планарий (рис. 3.38) показал, что сразу после операции во всех исследуемых точках зафиксировано увеличение показателя, причем в большей степени - в области головы и глотки. Далее, в конце наблюдений, во всех областях, за исключением глаз, вновь наблюдался рост, и снова более всего - в области глотки.

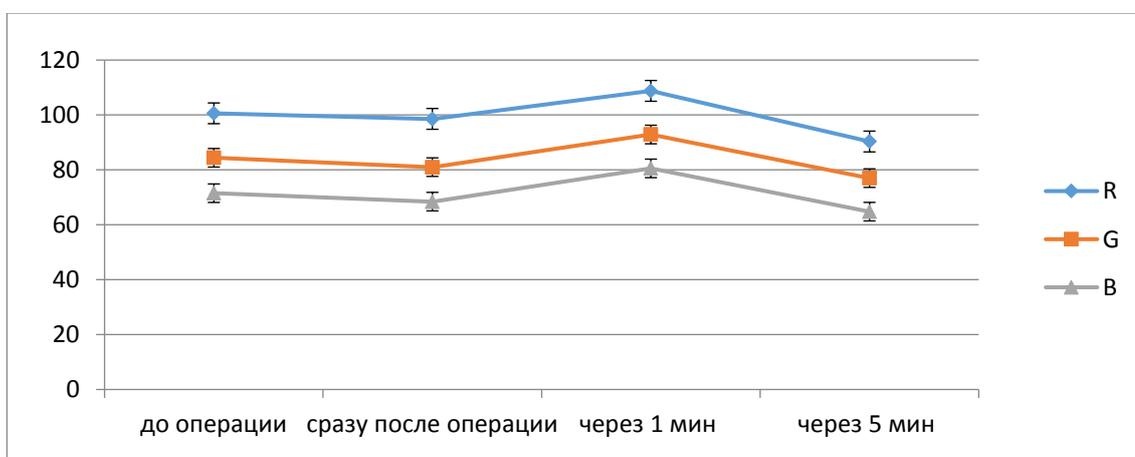
Рисунки 3.39 - 3.43 отражают динамику абсолютных показателей цвета в разных участках тела планарий.



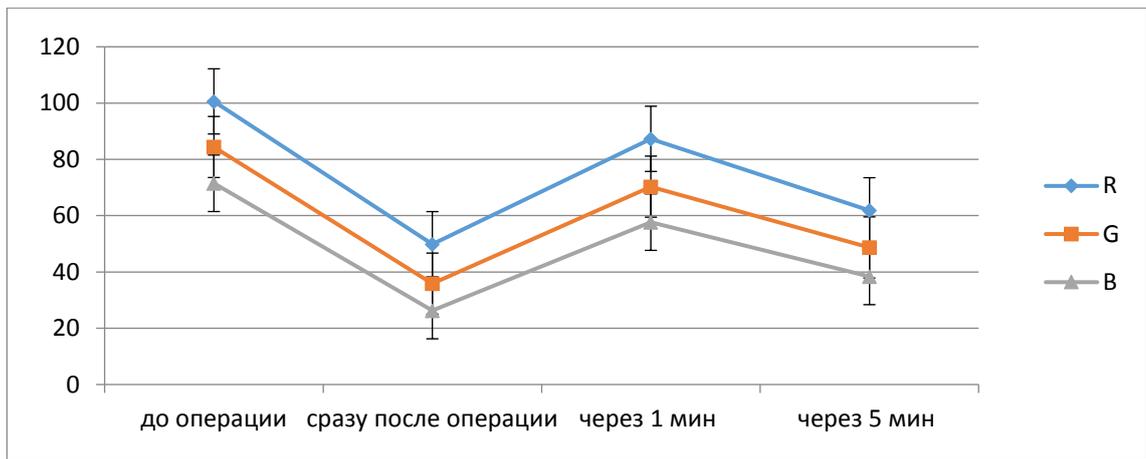
**Рис. 3.39 Динамика абсолютных величин основных цветов в области головы в ходе быстрого реагирования на травму**



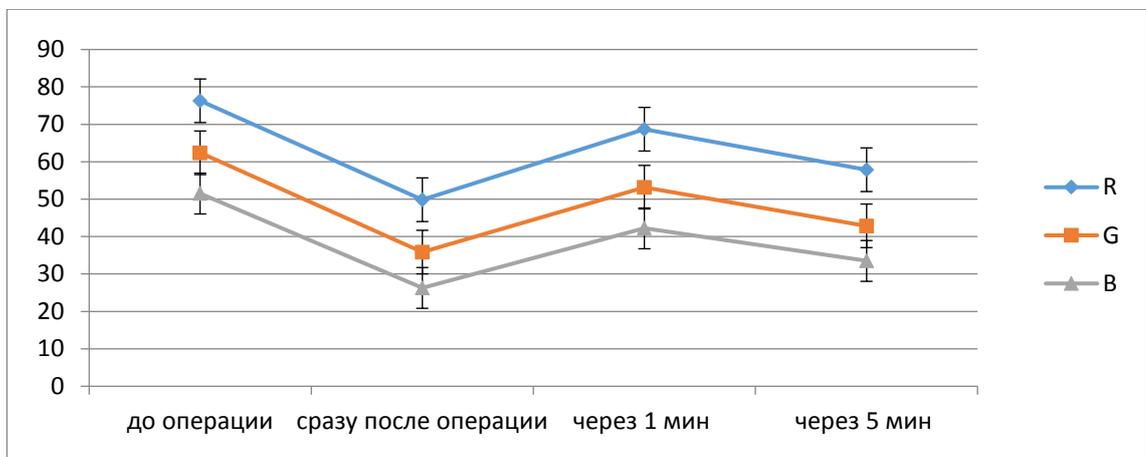
**Рис. 3.40 Динамика абсолютных величин основных цветов в области глаз в ходе быстрого реагирования на травму**



**Рис. 3.41 Динамика абсолютных величин основных цветов на раневой поверхности головного фрагмента в ходе быстрого реагирования на травму**



**Рис. 3.42** Динамика абсолютных величин основных цветов на раневой поверхности хвостового фрагмента при быстрой реакции на травму



**Рис. 3.43** Динамика абсолютных величин основных цветов в предло- точной области в ходе быстрого реагирования на травму

Как показал анализ динамики величин цветов, во всех участках тела цвета изменялись одинаково: сразу после операции - снижение величин показателей, затем через 1 мин. - рост (на раневой поверхности головного фрагмента- незначи- тельный), к 5 минуте наблюдений - вновь снижение (менее других - в области глаз). Необходимо отметить синхронность колебаний всех трех основных цветов в ходе измерений.

Рисунки 3.44 - 3.48 позволяют выявить динамику относительных показате- лей цвета поверхности тела планарий при быстрой реакции на травму.

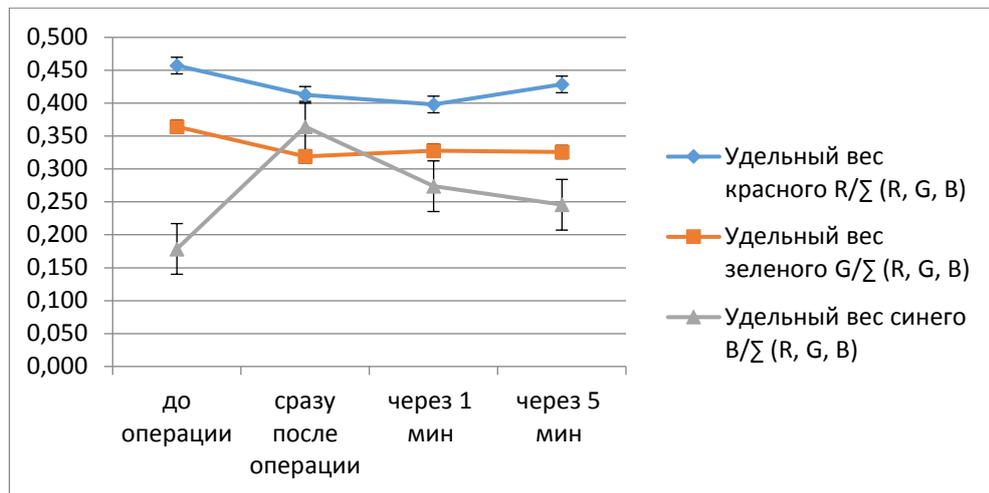


Рис. 3.44 **Динамика относительных долей основных цветов в области головы в ходе быстрого реагирования на травму**

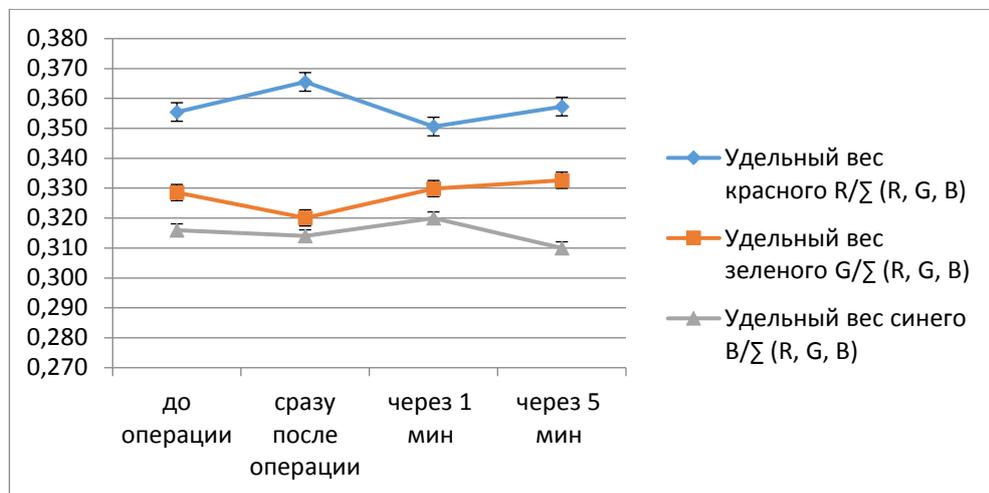


Рис. 3.45 **Динамика относительных долей основных цветов в области глаз в ходе быстрого реагирования на травму**

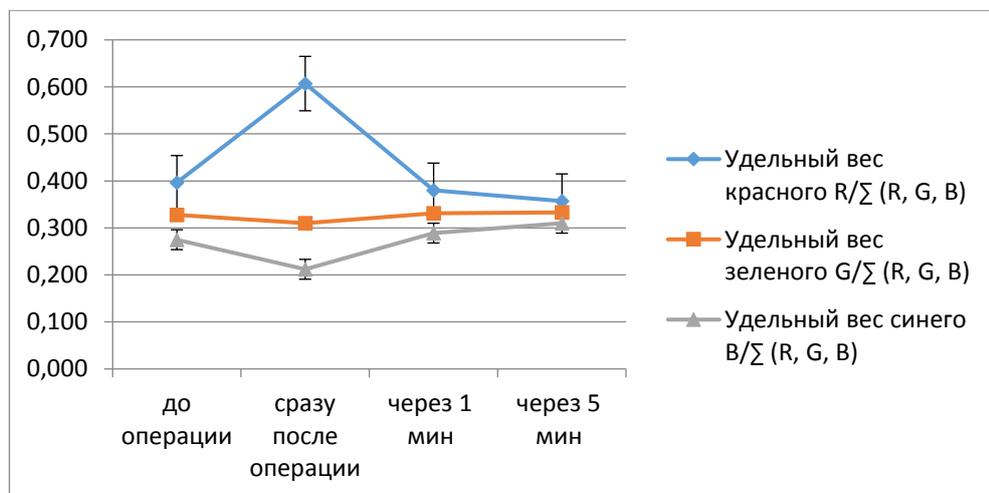
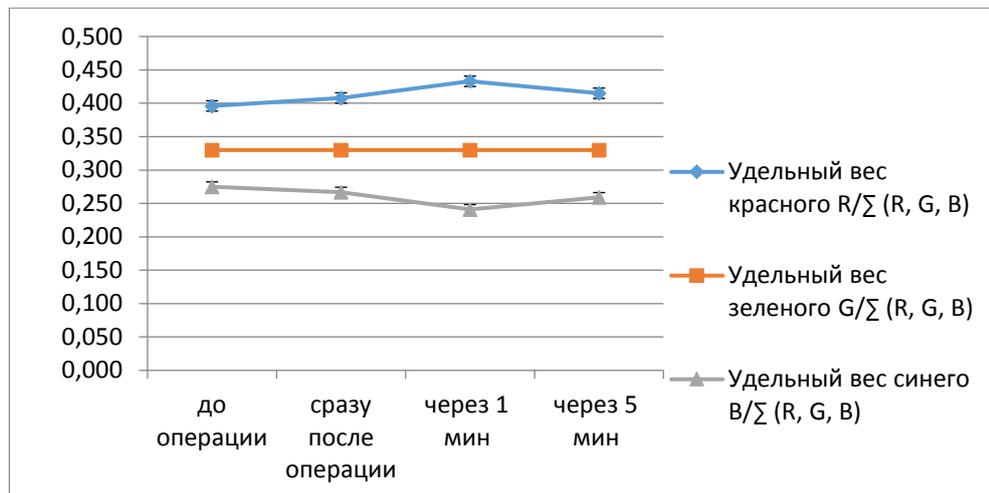
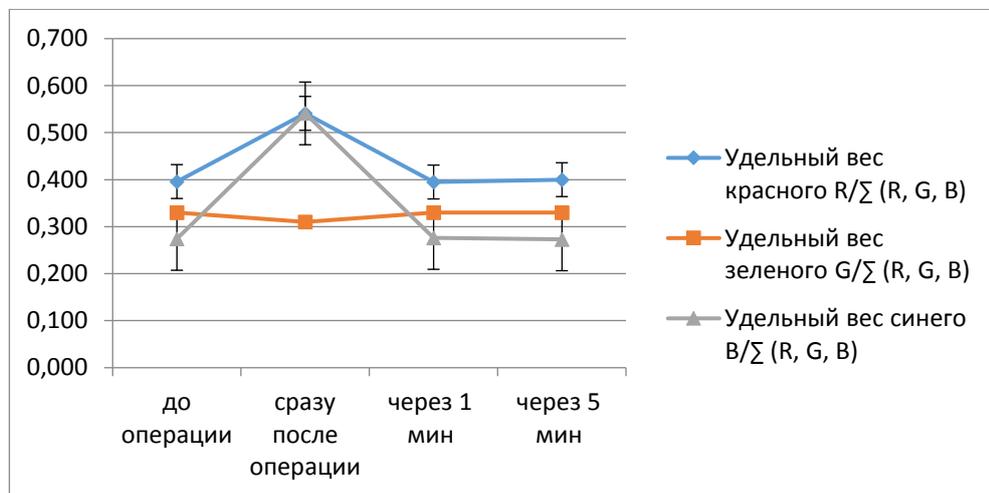


Рис. 3.46 **Динамика абсолютных величин основных цветов на раневой поверхности головного фрагмента в ходе быстрого реагирования на травму**



**Рис. 3.47** Динамика относительных долей основных цветов на раневой поверхности хвостового фрагмента при быстрой реакции на травму



**Рис. 3.48** Динамика относительных долей основных цветов в предглоточной области в ходе быстрого реагирования на травму

Так, сразу после операции сильнее всего менялись относительные показатели в области головы (удельный синий), на раневой поверхности головного фрагмента планарий (удельный красный) и в области глотки (оба названных цвета). Дальнейшая динамика относительных величин основных цветов носила более спокойный характер. Практически не зафиксировано колебаний измеряемых показателей на раневой поверхности хвостового регенеранта.

### 3.7 Цветометрический анализ адаптационных реакций планарий

С использованием метода биологической цветометрии были рассмотрены изменения в физиологическом состоянии планарий при охлаждении и в ходе последующей адаптации (рис. 3.49 - 3.58).

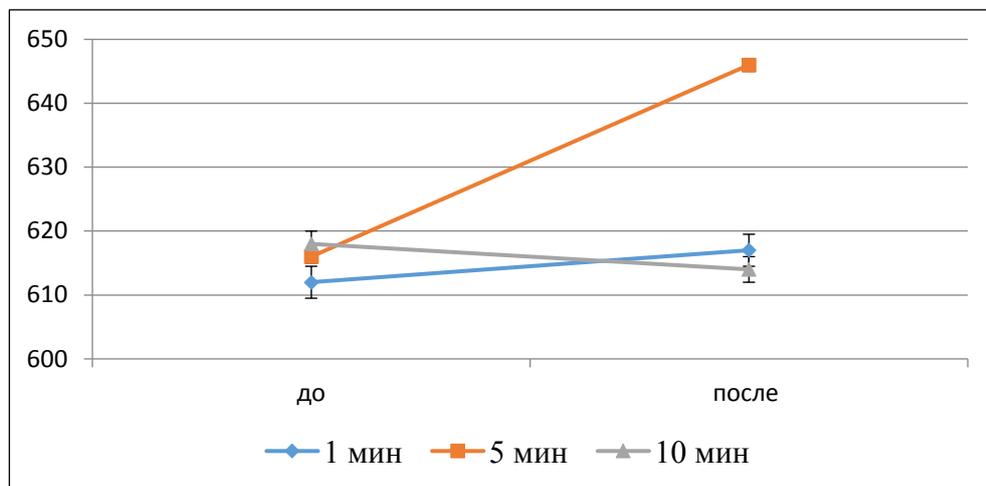


Рис. 3.49 Динамика длин волн цвета глаз при охлаждении (тон)

Длина волн цвета глаз планарии при охлаждении уже через 1 минуту несколько увеличилась, что означает «покраснение» цвета; наибольший рост зафиксирован через 5 минут охлаждения, а через 10 минут пребывания в холодной воде зарегистрировано снижение показателя - он сдвинулся в холодную часть спектра.

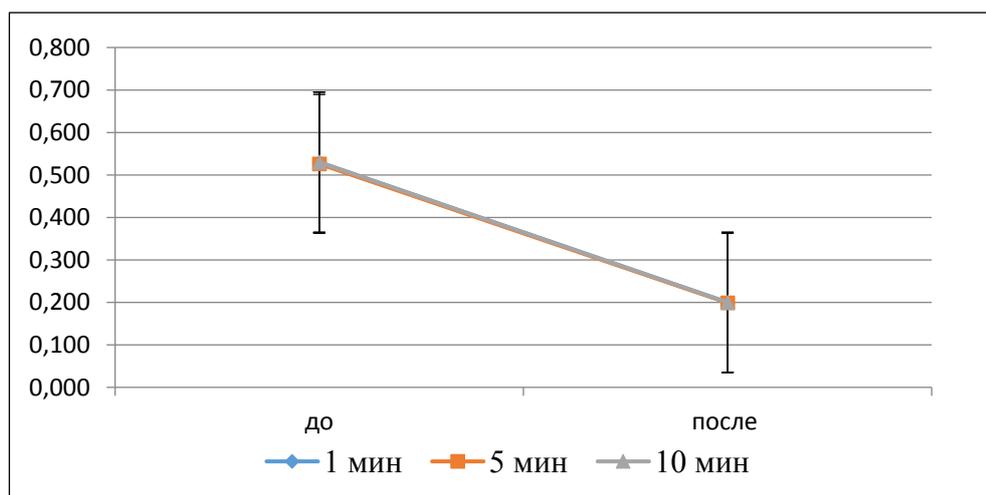


Рис. 3.50 Динамика теплоты цвета глаз при охлаждении

Теплота цвета снизилась уже через 1 минуту охлаждения и оставалась на этой величине и через 5 минут, и через 10 минут охлаждения.

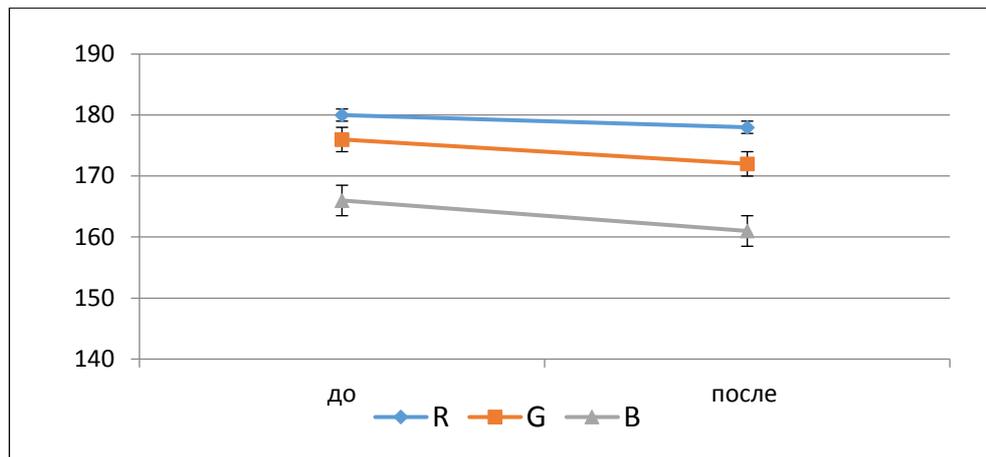


Рис. 3.51 **Динамика абсолютных компонентов цвета глаз при охлаждении (1 мин.)**

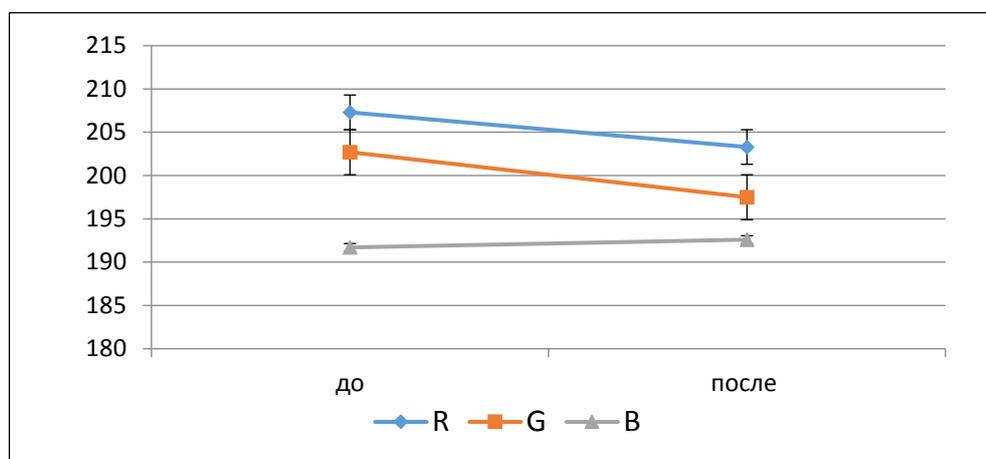


Рис. 3.52 **Динамика абсолютных компонентов цвета глаз при охлаждении (5 мин.)**

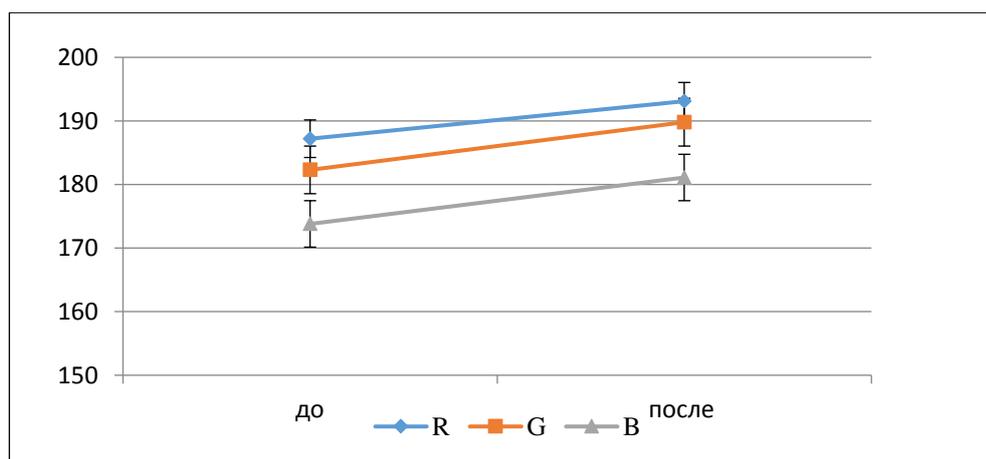


Рис. 3.53 **Динамика абсолютных компонентов цвета глаз при охлаждении (10 мин.)**

При охлаждении в течение 1 минуты все абсолютные показатели цвета глаз снизились, т. е. их цвет стал более темным, при 5-минутном охлаждении красный

и зеленый цвета снизились, а голубой остался на прежнем уровне. Но при охлаждении в течение 10 м зафиксирован рост абсолютных показателей всех цветов.

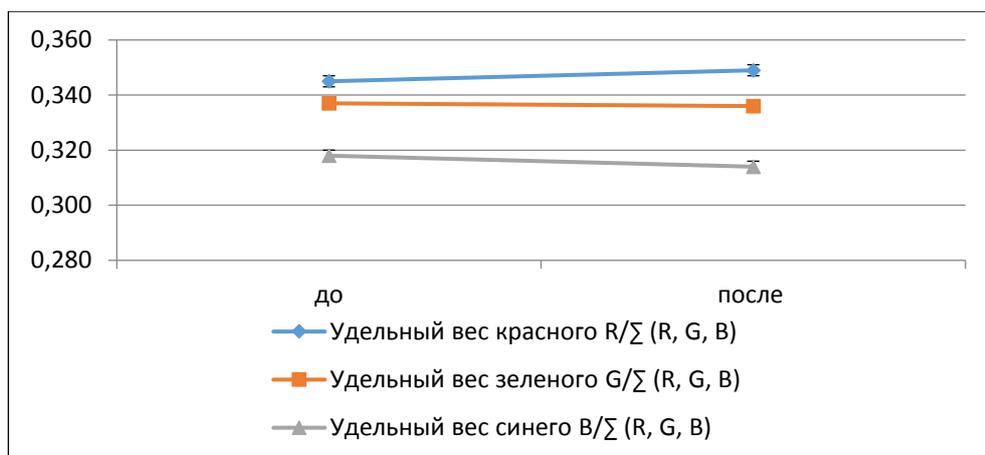


Рис. 3.54 **Динамика относительных компонентов цвета глаз при охлаждении (1 мин.)**

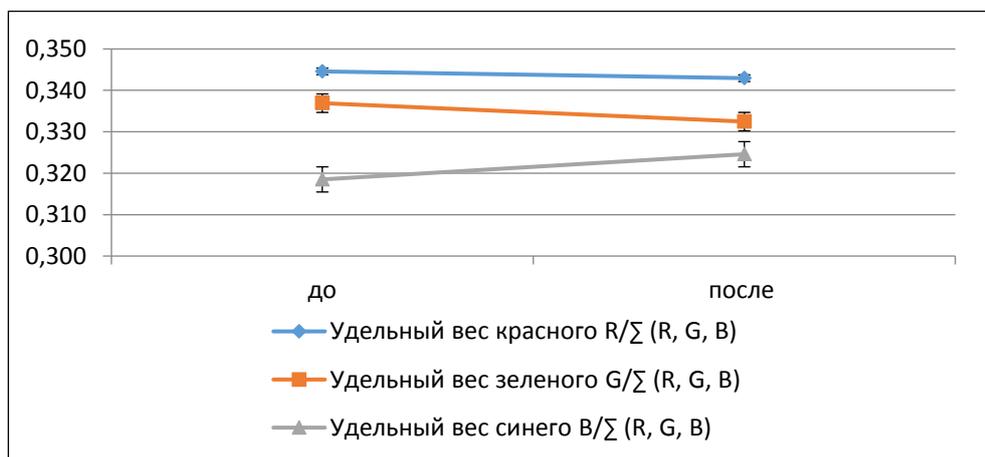


Рис. 3.55 **Динамика относительных компонентов цвета глаз при охлаждении (5 мин.)**

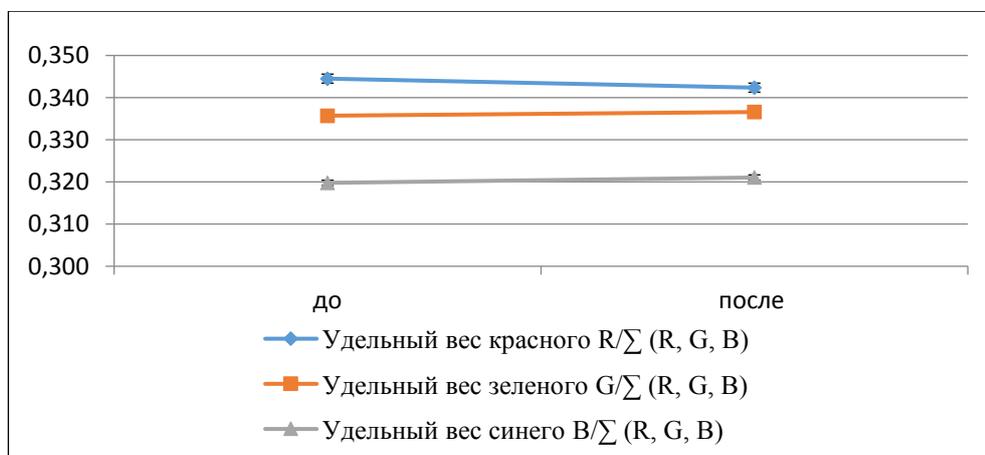


Рис. 3.56 **Динамика относительных компонентов цвета глаз при охлаждении (10 мин.)**

Наибольшая динамика относительных компонентов цвета при охлаждении зафиксирована при 5-минутном охлаждении. Это позволяет сделать вывод, что наиболее интенсивные адаптационные процессы происходят при 5-минутном охлаждении, а через 10 минут воздействия адаптация заканчивается.

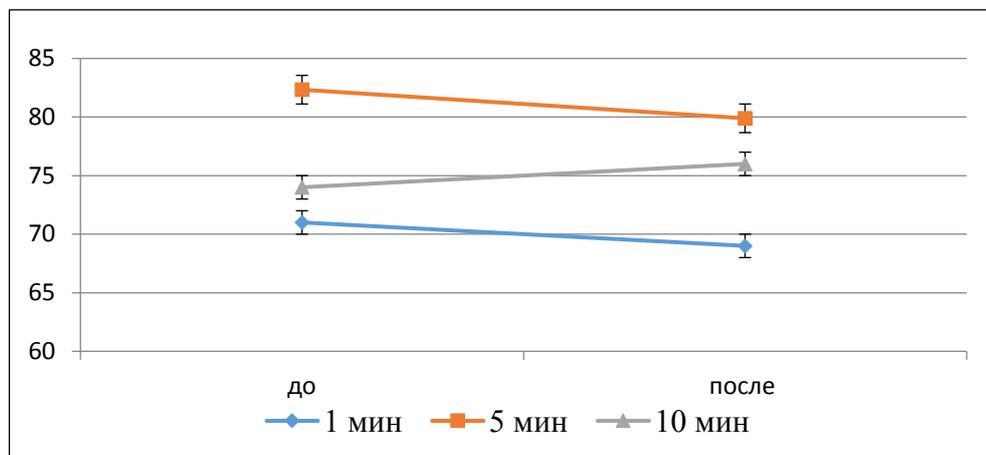


Рис. 3.57 **Динамика яркости цвета глаз при охлаждении**

Рис. 3.57 демонстрирует, что яркость цвета глаз в течение 1 и 5 минут снижается, а при 10-минутном охлаждении -увеличивается.

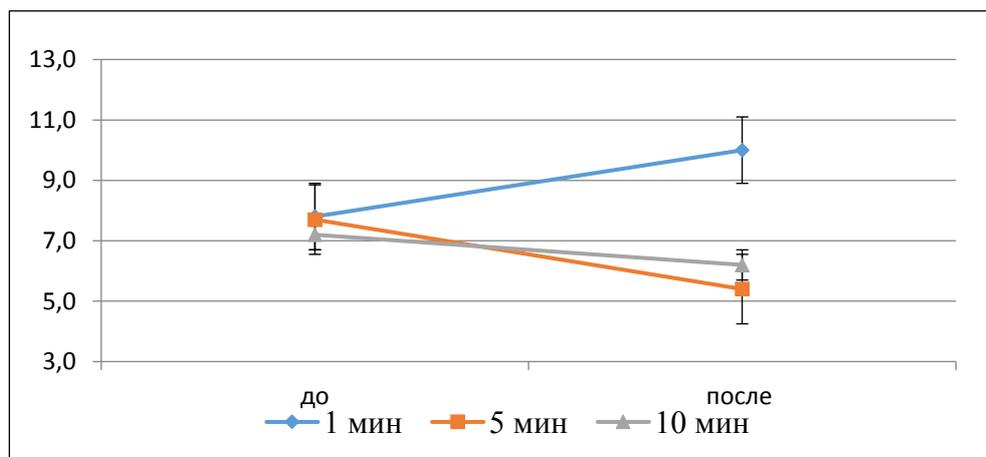


Рис. 3.58 **Динамика насыщенности цвета при охлаждении**

Насыщенность цвета при охлаждении в течение 1 минуты значительно растет (рост составил около 25%), а при охлаждении в течение 5 и 10 минут - снижается, причем уменьшение величины показателя при 5-минутном охлаждении также составило 25%, а при 10-минутном - около 14%. Так показатели цвета отражают процессы привыкания планарии к холодной воде и связанные с этим функциональные перестойки в ее организме.

## Заключение

Целью данной работы была разработка методики неинвазивного биофотонического контроля физиологических процессов у планарий *G. tigrina* на модели целого организма *in situ*.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

3. Разработка алгоритма анализа цветометрических и микрофотоспектральных характеристик организма.

4. Изучение фагоцитоза и регенерации планарий в различных условиях через анализ динамики размерных и биофотонических показателей (сверхслабая фотонная эмиссия (ССФЭ), характеристики цвета).

В ходе работы был проведен комплекс экспериментов по проверке чувствительности метода регистрации сверхслабого свечения, а также спектрометрического, цветометрического и морфометрического методов изучения физиологических процессов планарий на модели целого организма *in situ*.

В частности, методом регистрации сверхслабого свечения были исследованы фагоцитоз и регенерация планарий. Так как эти процессы у планарий основаны на активности стволовых клеток, а сверхслабое свечение объясняется образованием ими АФК, то результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод, что, во-первых, при фагоцитозе задействовано больше необластов, чем при регенерации, во-вторых, число активных необластов при регенерации прямо пропорционально количеству раневых поверхностей.

Методом регистрации ССФЭ была активность необластов планарий во время регенерации под воздействием хемотактического пептида fMLP (N-формилметионил-лейцил-фенилаланин) в концентрации  $10^{-9}$  М/л и апоцинина в концентрации  $10^{-4}$  М/л, ингибитора альфа NADH-оксидазы (АФК-системы). Эксперименты показали, что пептид fMLP, будучи стимулятором образования АФК, усиливает сверхслабое свечение примерно в 3 раза. Ингибирующее воздействие апоцинина проявилось в уменьшении пика ССФЭ и отдалении его во времени примерно на 5 часов.

Спектрофотометрический метод был применен к рассмотрению процесса фагоцитоза у планарий. Основная пища планарий - гемолимфа мотыля (личинки двукрылых), содержащая белки группы гемоглобинов. На графиках, характеризующих спектры поглощения голодных и фагоцитирующих планарий, отчетливо видны пики, совпадающие с длинами волн поглощения белков группы гемоглобинов. Таким образом, чувствительность спектрометрического метода подтверждена экспериментально.

Процесс регенерации планарий сопровождается изменением ее размерных показателей. Их измерение позволяет судить об интенсивности процесса регенерации, а значит, об активности необластов под воздействием различных факторов. Морфометрическим методом было рассмотрено воздействие на процесс регенерации планарий люминола, Метод динамической морфометрии позволил подтвердить, что люминол по отношению к процессу регенерации является ингибитором.

Также морфометрическим методом были исследована активность стволовых клеток планарий через размерные характеристики животных, регенерирующих под воздействием пептида fMLP в концентрациях  $10^{-9}$ ,  $10^{-11}$ ,  $10^{-13}$  моль/л. Эксперимент показал, что регенерация планарий под воздействием пептида в концентрации  $10^{-13}$  М/л идет активнее, чем при  $10^{-11}$  М/л и в контрольной группе.

Цветометрический метод был применен к изучению интенсивности фагоцитоза планарий в разных температурных режимах. Также предпринята попытка исследовать цветометрическим методом адаптационные процессы планарий в ответ на холодовое воздействие. Выяснено, что характеристики цвета планарий (теплота, тон, яркость и насыщенность, а также абсолютные и относительные показатели цвета) чутко реагируют на изменение физиологического состояния животных. В дальнейшем планируется выяснить зависимости между динамикой отдельных показателей цвета и изменениями состояния организма планарии.

Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают чувствительность используемых методов для изучения активности стволовых клеток на примере физиологических процессов планарии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Agata, K., Saito, Y. and Nakajima, E. (2007). Unifying principles of regeneration I: epimorphosis versus morphallaxis. *Dev. Growth Differ.* 49, 73-78. doi:10.1111/j. 1440-169X.2007.00919.x
2. Baguñà, J. (1976b). Mitosis in the intact and regenerating planarian *Dugesia mediterranea* n.sp. I. *J. Exp. Zool.* 195, 53-64. doi:10.1002/jez.1401950106
3. Baguñà, J. (2012). The planarian neoblast: the rambling history of its origin and some current black boxes. *Int. J. Dev. Biol.* 56, 19-37. doi:10.1387/ijdb.113463jb
4. Baguñà, J. and Romero, R. (1981). Quantitative analysis of cell types during growth, degrowth and regeneration in the planarians *Dugesia mediterranea* and *Dugesia tigrina*. *Hydrobiologia* 84, 184-191. doi:10.1007/BF00026179
5. Blassberg, R. A., Felix, D. A., Tejada Romero, B. and Aboobaker, A. A. (2013). PBX/extradenticle is required to re-establish axial structures and polarity during planarian regeneration. *Development* 140, 730-739. doi:10.1242/dev.082982
6. Brøndsted, H. V. (1969). *Planarian Regeneration*. Oxford, New York: Pergamon Press.
7. Cebrià, F. (2007). Regenerating the central nervous system: how easy for planarians! *Dev. Genes Evol.* 217, 733-748. doi:10.1007/s00427-007-0188-6
8. Chen, C.-C. G., Wang, I. E. and Reddien, P.W. (2013). PBX is required for pole and eye regeneration in planarians. *Development* 140, 719-729. doi:10.1242/dev.083741
9. Colour changes during deep fat frying / M.K. Krokida [at al] // *J. Food Engg.* - 2001. - Vol.48, N 3. - P. 219-225.
10. Eisenhoffer, G. T., Kang, H. and Sánchez Alvarado, A. (2008). Molecular analysis of stem cells and their descendants during cell turnover and regeneration in the planarian *Schmidtea mediterranea*. *Cell Stem Cell* 3, 327-339. doi:10.1016/j.stem.2008.07.002

11. Fields, C., Levin, M., (2018), Are planaria individuals? What regenerative biology is telling us about the nature of multicellularity, *Evolutionary Biology*, 45(3): 237–247.
12. Forsthoefel, D. J., Park, A. E. and Newmark, P. A. (2011). Stem cell-based growth, regeneration, and remodeling of the planarian intestine. *Dev. Biol.* 356, 445-459. doi:10.1016/j.ydbio.2011.05.669
13. Gaviño, M. A. and Reddien, P. W. (2011). A Bmp/Admp regulatory circuit controls maintenance and regeneration of dorsal-ventral polarity in planarians. *Curr. Biol.* 21, 294-299. doi:10.1016/j.cub.2011.01.017
14. Gurley, K. A., Elliott, S. A., Simakov, O., Schmidt, H. A., Holstein, T. W. and Sánchez Alvarado, A. (2010). Expression of secreted Wnt pathway components reveals unexpected complexity of the planarian amputation response. *Dev. Biol.* 347, 24-39. doi:10.1016/j.ydbio.2010.08.007
15. Gurley, K. A., Rink, J. C. and Sánchez Alvarado, A. (2008).  $\beta$ -catenin defines head versus tail identity during planarian regeneration and homeostasis. *Science* 319, 323-327. doi:10.1126/science.1150029
16. Hayashi, T., Shibata, N., Okumura, R., Kudome, T., Nishimura, O., Tarui, H. and Agata, K. (2010). Single-cell gene profiling of planarian stem cells using fluorescent activated cell sorting and its “index sorting” function for stem cell research. *Dev. Growth Differ.* 52, 131-144. doi:10.1111/j.1440-169X.2009.01157.x
17. Iglesias, M., Almuedo-Castillo, M., Aboobaker, A. A. and Saló, E. (2011). Early planarian brain regeneration is independent of blastema polarity mediated by the Wnt/ $\beta$ -catenin pathway. *Dev. Biol.* 358, 68-78. doi:10.1016/j.ydbio.2011.07.013
18. Image segmentation and maturity recognition algorithm based on color features of lingwu long jujube / Wang Yutan [at al] // *Advance journal of food science and technology*. - 2013. -vol.5, n 12. -p. 1623-1631.
19. Kozirok W. Cyfrowa analiza obrazu - zastosowanie w ocenie jakosci jeczmiennia browarnego / W. Kozirok, L. Fornal, A. Jaloza // *Przem. ferment. owoc.-warz..* - 2002. - T.46, N 12. - S. 24-27

20. Lapan, S. W. and Reddien, P. W. (2011). Dlx and Sp6-9 control optic cup regeneration in a prototypic eye. *PLoS Genet.* 7, e1002226. doi:10.1371/journal.pgen.1002226
21. Liu SY, Selck C, Friedrich B, Lutz R, Vila-Farre M, Dahl A, Brandl H, Lakshmanaperumal N, Henry I, Rink JC. Reactivating head regrowth in a regeneration-deficient planarian species. *Nature.* 2013; 500:81–84. [PubMed: 23883932]
22. LoCasio, S. A., Lapan, S. W. and Reddien, P. W. (2017). Eye absence does not regulate planarian stem cells during eye regeneration. *Dev. Cell* 40, 381-391.e3. doi:10.1016/j.devcel.2017.02.002
23. Mario Ivankovic, Radmila Haneckova, Albert Thommen, Markus A. Grohme, Miquel Vila-Farré, Steffen Werner, Jochen C. Rink Model systems for regeneration: planarians. *Development* (2019) 146, dev167684. doi:10.1242/dev.167684 <https://dev.biologists.org/content/146/17/dev167684.article-info>
24. Methodological techniques for identifying plant communities based on earth remote sensing data and field research / T.A. Adamovich [at al] // Теоретическая и прикладная экология. - 2019. - № 2. - С. 39-43.
25. Modelling of the kinetics of colour change in hazelnutz during air roasting / A.D. Demir [at al] // J. Food Engg. - 2002. - Vol. 55, N 4. - P. 283-292.
26. Molina, M. D., Neto, A., Maeso, I., Gómez-Skarmeta, J. L., Saló, E. and Cebrià, F. (2011). Noggin and noggin-like genes control dorsoventral axis regeneration in planarians. *Curr. Biol.* 21, 300-305. doi:10.1016/j.cub.2011.01.016
27. Molinaro, A. M. and Pearson, B. J. (2016). In silico lineage tracing through single cell transcriptomics identifies a neural stem cell population in planarians. *Genome Biol.* 17, 87. doi:10.1186/s13059-016-0937-9
28. Montgomery JR, Coward SJ. On the minimal size of a planarian capable of regeneration. *Trans Amer Micros Soc.* 1974; 93:386–391.
29. Morgan, T. (1898). Experimental studies of the regeneration of *Planaria maculata*. *Arch. Entw. Mech. Org.* 7, 364-397. doi:10.1007/BF02161491
30. Munsell book of color: glossy finish collection: removable samples in two binders. - Baltimore: Munsell color, Macbeth. - 1976. - 75 p.

31. Newmark, P. A. and Sánchez Alvarado, A. (2000). Bromodeoxyuridine specifically labels the regenerative stem cells of planarians. *Dev. Biol.* 220, 142-153. doi:10.1006/dbio.2000.9645
32. Newmark, P. A. and Sánchez Alvarado, A. (2002). Not your father's planarian: a classic model enters the era of functional genomics. *Nat. Rev. Genet.* 3, 210-219. doi:10.1038/nrg759
33. Newmark, P. A., Wang, Y. and Chong, T. (2008). Germ cell specification and regeneration in planarians. *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* 73, 573-581. doi:10.1101/sqb.2008.73.022
34. Oderberg, I. M., Li, D. J., Scimone, M. L., Gaviño, M. A. and Reddien, P. W. (2017). Landmarks in existing tissue at wounds are utilized to generate pattern in regenerating tissue. *Curr. Biol.* 27, 733-742. doi:10.1016/j.cub.2017.01.024
35. Petersen, C. P. and Reddien, P. W. (2008). Smed-betacatenin-1 is required for anteroposterior blastema polarity in planarian regeneration. *Science* 319, 327-330. doi:10.1126/science.1149943
36. Petersen, C. P. and Reddien, P. W. (2011). Polarized notum activation at wounds inhibits Wnt function to promote planarian head regeneration. *Science* 332, 852-855. doi:10.1126/science.1202143
37. Pongratz, N., Storhas, M., Carranza, S. and Michiels, N. K. (2003). Phylogeography of competing sexual and parthenogenetic forms of a freshwater flatworm: patterns and explanations. *BMC Evol. Biol.* 3, 23. doi:10.1186/1471-2148-3-23
38. Randolph, H. (1897). Observations and experiments on regeneration in planarians. *Arch. Entw. Mech. Org.* 5, 352-372. doi:10.1007/BF02162271
39. Reddien, P. W. and Sánchez Alvarado, A. (2004). Fundamentals of planarian regeneration. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 20, 725-757. doi:10.1146/annurev.cellbio.20.010403.095114
40. Reddien, P.W. (2018). The cellular and molecular basis for planarian regeneration. *Cell* 175, 327-345. doi:10.1016/j.cell.2018.09.021

41. Reddien, P.W., Bermange, A. L., Kicza, A. M. and Sánchez Alvarado, A. (2007). BMP signaling regulates the dorsal planarian midline and is needed for asymmetric regeneration. *Development* 134, 4043-4051. doi:10.1242/dev. 007138
42. Rink, J. C. (2018). Stem cells, patterning and regeneration in planarians: selforganization at the organismal scale. *Methods Mol. Biol.* 1774, 57-172. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_2
43. Ross, K. G., Omuro, K. C., Taylor, M. R., Munday, R. K., Hubert, A., King, R. S. and Zayas, R. M. (2015). Novel monoclonal antibodies to study tissue regeneration in planarians. *BMC Dev. Biol.* 15, 2. doi:10.1186/s12861-014-0050-9
44. Saló, E. and Agata, K. (2012). Planarian regeneration: a classic topic claiming new attention. *Int. J. Dev. Biol.* 56, 3-4. doi:10.1387/ijdb.123495es
45. Scimone, M. L., Cote, L. E. and Reddien, P. W. (2017). Orthogonal muscle fibres have different instructive roles in planarian regeneration. *Nature* 551, 623-628. doi:10.1038/nature24660
46. Shahin M.A., Hatcher D.W., Symons S.J. Use of imaging methods for assessment of Asian noodle color // *Cereal Foods World*; St. Paul.-2006.-Vol.51,N 4.-P. 172-175.-АНГЛ.-Bibliogr.: p.175.
47. Sikes JM, Newmark PA. Restoration of anterior regeneration in a planarian with limited regenerative ability. *Nature*. 2013; 500:77–80. [PubMed: 23883929]
48. Sluys, R. and Riutort, M. (2018). Planarian diversity and phylogeny. *Methods Mol. Biol.* 1774, 1-56. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_1
49. Stjernholm, R.L., Allen, R.C., Steele, R.H., Waring, W.W., Harris, J.A. (1973) *Infect. Immun.*, 7, 313–4.
50. Tanaka, E. M. and Reddien, P. W. (2011). The cellular basis for animal regeneration. *Dev. Cell* 21, 172-185. doi:10.1016/j.devcel.2011.06.016
51. Thi-Kim Vu, H., Rink, J. C., McKinney, S. A., McClain, M., Lakshmanaperumal, N., Alexander, R. and Sánchez Alvarado, A. (2015). Stem cells and fluid flow drive cyst formation in an invertebrate excretory organ. *eLife* 4, e07405. doi:10.7554/eLife.07405

52. Thommen, A., Werner, S., Frank, O., Philipp, J., Knittelfelder, O., Quek, Y., Fahmy, K., Shevchenko, A., Friedrich, B. M., Jülicher, F. et al. (2019). Body size-dependent energy storage causes Kleiber's law scaling of the metabolic rate in planarians. *eLife* 8, 420. doi:10.7554/eLife.38187

53. Umesono Y, Tasaki J, Nishimura Y, Hrouda M, Kawaguchi E, Yazawa S, Nishimura O, Hosoda K, Inoue T, Agata K. The molecular logic for planarian regeneration along the anterior-posterior axis. *Nature*. 2013; 500:73–76. [PubMed: 23883928]

54. Umesono, Y. and Agata, K. (2009). Evolution and regeneration of the planarian central nervous system. *Dev. Growth Differ.* 51, 185-195. doi:10.1111/j.1440-169X.2009.01099.x

55. Vila-Farré, M. and Rink, J. C. (2018). The ecology of freshwater planarians. *Methods Mol. Biol.* 1774, 173-205. doi:10.1007/978-1-4939-7802-1\_3

56. Wagner, D. E., Wang, I. E. and Reddien, P. W. (2011). Clonogenic neoblasts are pluripotent adult stem cells that underlie planarian regeneration. *Science* 332, 811-816. doi:10.1126/science.1203983

57. Wenemoser, D. and Reddien, P. W. (2010). Planarian regeneration involves distinct stem cell responses to wounds and tissue absence. *Dev. Biol.* 344, 979-991. doi:10.1016/j.ydbio.2010.06.017

58. Witchley, J. N., Mayer, M., Wagner, D. E., Owen, J. H. and Reddien, P.W. (2013). Muscle cells provide instructions for planarian regeneration. *Cell Rep.* 4, 633-641. doi:10.1016/j.celrep.2013.07.022

59. Автоматизация обработки микрофотографий молочных продуктов с использованием IMAGEJ и STATISTICA / В.К. Битюков [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 4 (62). С. 58-63.

60. Автоматизированный анализ изображений полипов кишечника / И.В. Ярема [и др.] // Сеченовский вестник. - 2015. - № 4 (22). - С. 12-16.

61. Активированная люцигенином хемилюминесценция тканей животных / Н.С. Матвеева [и др.] // Биофизика. - 2007. - Т. 52. - № 6. - С. 1120-1127.

62. Аникина Н.С. Методы оценки цвета вин. обзор / Н.С. Аникина, С.Н. Червяк, Н.В. Гниломедова // Аналитика и контроль. 2019.- Т.23. -№2. - С.158-167.
63. Афанасьева О.Б. Экзоскелет позвоночных: геометрические закономерности формирования рельефа панциря у ранних бесчелюстных (AGNATHA, VERTEBRATA) // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 489.- № 1. - С. 99-102
64. Ахмедханов А.М. Взаимосвязь особенностей восприятия цвета с психофизиологическими характеристиками личности // Вестник научных конференций. - 2015. - № 1-3. - С. 16-17.
65. Байдала Д.А. Идентификация фарфоровых изделий по виду материала методами спектроколметрии // Зеленый коридор. - 2017 - № 2. - С. 15-17.
66. Барышова Е.О. Анализ цвета листовых пластин / Е.О. Барышова, А.И. Довганюк // Вестник ландшафтной архитектуры. - 2016. - № 7. - С. 10-14.
67. Бацевич В.А. Изучение секулярных изменений цвета глаз у населения Архангельской области / В.А. Бацевич, Ю.В. Лоскутова, М.А. Негашева // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология.- 2013.-№ 1.-С. 104-110.
68. Бекетов С.В. Связь между окраской волосяного покрова и репродуктивностью самок соболей клеточного содержания / С.В. Бекетов, Т.И. Казакова // Кролиководство и звероводство. - 2012. - № 2. - С. 16-19.
69. Болат-Оол Ч.К. Характеристика шерсти верблюдов Республики Тыва / Ч.К. Болат-Оол, С.Д. Монгуш, В.Г. Двалишвили // Овцы, козы, шерстяное дело. - 2016. - № 1. - С. 45-46.
70. Борисов Р.Р. Влияние интенсивности освещения на окраску личинок камчатского (PARALITHODES CAMTSCHATICUS (TILESIUS)) и синего (PARALITHODES PLATYPUS (BRANDT)) крабов (DECAPODA, LITHODIDAE) / Р.Р. Борисов, Д.С. Печёнкин // Зоологический журнал. - 2018. - Т. 97. - № 10. - С. 1231-1237.
71. Боровиков В.П., Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. Учебное пособие для вузов / В.П. Боровиков // М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 288 с.

72. Бочерова И.Н. Симфония вкуса и цвета / И.Н. Бочерова, С.В. Малуева, О.Г. Вербитская // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. -2018.- №13. - С.352-356.

73. Булыгин С.Ю. Оценка гумусированности почв путем обработки их цифровых фотоизображений / С.Ю. Булыгин, Д.И. Бидолах, Ф.Н. Лисецкий // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. - 2011. - № 15 (110). - С. 154-159.

74. Буянова Д.В. Оценка сезонных изменений цветовой среды на экологических тропах г. Москвы / Д.В. Буянова, А.И. Довганюк // Вестник ландшафтной архитектуры. - 2018. - № 15. - С. 16-21.

75. Вавилова О.И. Анализ изменения цвета (потемнения) и активности полифенолоксидазы при холодном хранении в модифицированной газовой среде свеженарезанных, готовых к употреблению яблок сорта Золотое Превосходное. (Испания. Израиль) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. - 2004. - № 4. - С. 1372.

76. Валеева А.А. Оценка цвета лесостепных почв с помощью цифровой фотосъемки в лабораторных условиях / А.А. Валеева, А.Б. Александрова, Г.Ф. Копосов // Почвоведение. - 2016. - № 9. - С. 1101-1106.

77. Ван Лиероп Р. Значение цвета и узора для электрических инсектицидных ловушек // Пест-Менеджмент. - 2013. - № 2 (86). - С. 32-34.

78. Визуальные и цветометрические экспресс-способы суммарного определения дубильных веществ в растительном сырье/С.П. Калинкина [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2016. - № 2 (68). - С. 223-229

79. Витер В.И. О возможности количественной характеристики цвета кровоподтека при определении давности его образования / В.И. Витер, А.В. Литвинов, С.В. Чирков // Фундаментальные исследования.- 2014.- №10-5.-С.869-872.

80. Владимирова Е.В. Использование шкалы RAL в качестве индикатора для определения цвета языка / Е.В. Владимирова, Н.А. Валитова, А.Н. Плакуев // Современная медицина: актуальные вопросы. - 2015. - № 42-43. - С. 67-72.

81. Влияние ингибиторов NO-синтазы, содержащих тиамидиновый фрагмент, на люминолзависимую хемилюминесценцию нейтрофилов человека / С.Я. Проскуряков. [и др.] // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. - 2006. - № 2. - С. 31-33.

82. Влияние параметров обработки ревеня и крыжовника на формирование цвета // A. Dubinina [et al] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2017. - Т. 6. - № 11 (90). - С. 66-71.

83. Внутривидовая дифференциация окраски зимнего меха PTEROMYS VOLANS (SCIURIDAE, MAMMALIA) в пределах ареала / С.Н. Гашев [и др.] // Nature Conservation Research. - Заповедная наука. - 2019. - Т. 4. - № 4. - С. 65-72.

84. Водяницкий Ю.Н. Использование системы CIE-L\*A\*B\* для характеристики цвета почв / Ю.Н. Водяницкий, Н.П. Кириллова // Почвоведение. - 2016. - № 11. - С. 1337-1346.

85. Водяницкий Ю.Н. Перевод цветовых показателей почвы из системы Манселла в систему CIE-L\*A\*B\*: таблицы и примеры расчета / Ю.Н. Водяницкий, Н.П. Кириллова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. - 2016. - № 4. - С. 3-11.

86. Воловар О.С. Клиническая характеристика состояния соединительной ткани организма при заболеваниях височно-нижнечелюстного сустава методом иридодиагностики, с учетом состояния склер, патологии органа зрения / О.С. Воловар, В.А. Маланчук, О.А. Крыжановская // Вестник стоматологии. 2010. - № 4 (73). - С. 54-59.

87. Воробьева Н.Н. Методы оценки цвета кетчупа (Чехия) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал.-2000. - №3. -С.962.

88. Галанин С.И. Выбор конструкционных металлов и сплавов для ювелирных изделий на основе анализа их цветовых характеристик / С.И. Галанин, К.Н. Колупаев // Труды Академии технической эстетики и дизайна. 2014. - № 1. - С. 31-35.

89. Галанин С.И. Методика оценки колористических характеристик ювелирных изделий и бижутерии / С.И. Галанин, А.С. Ляпина // Труды Академии технической эстетики и дизайна. - 2018. - № 1. - С. 19-23.
90. Герасимов А.В. Численные характеристики окраски плодов паприки (CAPSICUM ANNUUM) в режиме RGB / А.В. Герасимов, Я.С. Бурьгина // Химия растительного сырья. - 2002. - № 2. - С. 75-78.
91. Горожанкина Е.О. Знаковая информация цвета в текстильном производстве / Е.О. Горожанкина, Т.В. Козлова // Интеграция науки и производства. - 2013. - № 5. - С. 44-46.
92. Губинская Т.В. Колориметрическая идентификация апельсиновой соковой продукции // Зеленый коридор. - 2017. - № 2. - С. 31-33.
93. Гурвич А.А. Проблема митогенетического излучения как аспект молекулярной биологии / А.Г. Гурвич // Ленинград. - Медицина. - 1968.
94. Гурова Т.А. Использование виртуального прибора "Листомер" для определения площади поражения листьев / Т.А. Гурова, О.С. Луговская, Е.А. // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. - 2016. - № 6 (263). - С. 82-89.
95. Дао Ти Ван. Хемилюминесценция культивируемых грибов Вьетнама / Дао Ти Ван, Н.С. Мануковский, И.И. Гительзон // Доклады Академии наук. - 2013. - т. 448. - № 3. - с. 349.
96. Двухканальная модель ахроматического зрения лягушки / Ч.А. Измаилов [и др.] // Сенсорные системы. - 2006. - т. 20. - № 1. - с. 21-31.
97. Денисенко Т.Н. Оценка качества кофе / Т.Н. Денисенко, С.В. Гаценко // Научный взгляд в будущее. - 2016. - Т. 2. - № 1. - С. 256-260.
98. Джапова В.В. Влияние фона стенок контейнеров на пигментацию личинок XENOPUS LAEVIS / В.В. Джапова, С.М. Стародубов, В.А. Голиченков // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. - 2012. - № 2.- С. 19-22.
99. Диагностика почвенных горизонтов по цвету (на примере почв Подмосковья) / Кириллова Н.П. [и др.] // Почвоведение.- 2018. - № 11. - С. 1363-1371.
100. Долматова Л.С. Особенности накопления тяжелых металлов в тканях двух цветных форм голотурии EUPENTACTA FRAUDATRIX в летне-осенний

период / Л.С. Долматова, Е.Н. Слинко, Л.Ф. Колосова // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. - 2018. - № 1 (197). - С. 71-78.

101. Дорофеева А.А. История развития методов изучения цвета глаз (ретроспектива шкал для определения пигментации и структуры радужки) / А.А. Дорофеева, Ю.В. Лоскутова, М.А. Негашева//Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология.-2012.-№2.-С.111-122.

102. Дудорова Е.В. Взаимосвязи параметров качества жизни и цветовых предпочтений у мужчин и женщин / Е.В. Дудорова, Е.А. Шалагина // Вестник Пермского университета. Философия. Психология. Социология. - 2019. - № 3. - С. 372-378.

103. Дьячкин И.И. Совершенствование неразрушающих методов контроля качества табачной продукции / И.И. Дьячкин, В.А. Саломатин, З.П. Белякова // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология.-2013.-№1 (331).- С.5-9.

104. Езерский В.А. Количественная оценка цвета керамических лицевых изделий // Строительные материалы. - 2015. - № 8. - С. 76-80.

105. Епланова Г.В. Анализ окраски прыткой ящерицы из двух популяций Самарской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2016. - Т. 18. - № 5-2. - С. 264-274.

106. Ермоченков М.Г. Изменение цвета древесины березы при тепловом воздействии / М.Г. Ермоченков, А.В. Хроменко //Лесотехнический журнал. 2017. - Т. 7. - № 3 (27). - С. 15-21.

107. Ершова А.Н. Сукцинатдегидрогеназа и свободнорадикальные процессы в митохондриях растений кукурузы при действии гипоксии и CO<sub>2</sub>-среды / А.Н. Ершова, О.С. Бердникова, Л.В. Чеботова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. - 2018. - № 3. - С. 186-192.

108. Жукова О.Ю. Влияние острой алкогольной интоксикации на хемилюминесценцию митохондрий печени при экспериментальном сахарном диабете /

О.Ю. Жукова, В.Е. Высокогорский / Успехи современного естествознания. // 2005. - № 10. - С. 54-55.

109. Закономерности изменений внешней морфологии и осевого скелета у молоди лососёвых рыб (SALMONIDAE) в связи со смолтификацией / К.В. Кузищин [и др.] // Вопросы ихтиологии. 2019. Т. 59. № 5. С. 531-546.

110. Залибеков З.Г. Методы изучения разнообразия почв западного Прикаспия по космическим снимкам высокого разрешения / З.Г. Залибеков, А.Б. Биарсланов // Исследование Земли из космоса. - 2018. - № 4. - С. 59-70.

111. Запорожец О.В. Определение цветового типа шкурок соболя с применением компьютерной техники / О.В. Запорожец, А.И. Сапожникова, А.Н. Квашук // Кролиководство и звероводство. - 2013. - № 3. - С. 21-22.

112. Затяева Е.К. Цвет в архитектурной среде вахтовых посёлков // Architecture and Modern Information Technologies. - 2019. - № 2 (47). - С. 318-331.

113. Захаров И.Г. К вопросу о количественной проверке нетрадиционных методов диагностики / И.Г. Захаров, О.Ф. Тырнов // Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Серия Медицина. - 2001. - № 2 (523). - С. 84-90.

114. Золотарева Е.Ю. Мультиспектральный анализ изображений зеленых растений для идентификации стрессовых состояний / Е.Ю. Золотарева, А.Г. Зотин, А.А. Тихомиров // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. - 2012. - Т. 1. - № 8. - С. 355-356.

115. Иванкова М.Н. Изучение динамики цветовых параметров порошкового лекарственного растительного сырья при длительном хранении / М.Н. Иванкова, Г.Н. Бузук // Вестник фармации. - 2013. - № 2 (60) - С. 34-39.

116. Иванов А.В. Определение цветовых характеристик объекта исследования компьютерными средствами в ходе проведения судебной экспертизы / А.В. Иванов, К.В. Протасов // Общество и право. - 2019. - № 4 (70). - С. 69-74.

117. Игнатова А.М. Взаимосвязь структуры и цветности камнелитых материалов, полученных на основе минерального нерудного и техногенного сырья /

А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов // Фундаментальные исследования. - 2012. - № 6-2. - С. 435-440.

118. Изменение цвета овечьей шерсти по основным этапам переработки / Э.К. Нармбаева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2016. - № 6 (366). - С. 324-328.

119. Изменения в кинетике хемилюминесценции плазмы как мера системного окислительного стресса в организме человека / М.М. Созарукова [и др.] // Биофизика. - 2016. - Т. 61. - № 2. - С. 337-344.

120. Изучение антиоксидантной активности некоторых лекарственных растений Забайкалья методом хемилюминесценции / П.Б. Цыдендамбаев [и др.] // Дальневосточный медицинский журнал. - 2006. - № 3. - С. 83-85.

121. Интеллектуальная система распознавания состояния растений / Ю.А. Шестакова [и др.] // Вестник Технологического университета. - 2018. - Т. 21. - № 10. - С. 175-180.

122. Использование компьютерной диагностики для объективной характеристики цвета почв / В.И. Савич [и др.] // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. - 2004. - № 4. - С. 38-51.

123. Исследование цвета растительных порошков с использованием компьютерной цветометрии / А. Ниemiрич [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2016. - Т. 4. - № 11 (82). - С. 15-20.

124. Ишкулов Д.Г. Особенности цветовосприятия у серых тюленей / Д.Г. Ишкулов, А.Л. Михайлюк, М.В. Пахомов // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2013. - № 4 (15). - С. 84-90.

125. Казанкова И.И. Рост молодежи средиземноморской мидии (*MYTILUS GALLOPROVINCIALIS*, *BIVALVIA*, *MYTILIDA*) у открытых берегов южного и юго-западного Крыма в зависимости от глубины и принадлежности к цветовой морфе / И.И. Казанкова, П.В. Гайский, А.А. Котолупова // Зоологический журнал. - 2018. - Т. 97. - № 11. - С. 1317-1329.

126. Казеннова Н.К. Разработка метода оценки цвета макаронных изделий на коллориметре KONIKA MINOLTA / Н.К. Казеннова, Д.В. Шнейдер, О.В. Соцкова // Плодоводство и ягодоводство России. - 2012. - Т. 33. - С. 209-215.

127. Казымова Ф.Т.Г. Исследование взаимосвязи индекса RI и колориметрических показателей измерения органического содержания почвы//Аграрный научный журнал.-2020.-№ 1.-С.13-16.

128. Калинина М.В. Созревание и цветковые характеристики яичников японского мохнаторукого краба ERIOCHEIR JAPONICUS / М.В. Калинина, Н.А. Винникова, Е.Г. Семенькова // Онтогенез. - 2008. - Т. 39. - № 1. - С. 58-65.

129. Кантюков С.А. Свободнорадикальное окисление в цельной крови при физических нагрузках различной длительности и интенсивности / С.А. Кантюков, Е.Н. Ермолаева, Л.В. Кривохижина // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 6. С. 68.

130. Карабашев Г.С. Об индикации придонного переноса на морском мелководье по данным спутникового сканера цвета океана / Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко, С.В. Шеберстов//Океанология. - 2009. - Т.49. - №1. - С.28-36.

131. Карабашев Г.С. Об информативности съемки морских прибрежий спутниковыми сканерами цвета океана / Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко // Океанология. - 2013. - Т. 53. - № 6. - С. 750.

132. Карачаушева В.А. Способы определения цвета зубов в стоматологии // Бюллетень медицинских интернет-конференций. - 2015. - Т. 5. - № 10. - С. 1170.

133. Качественная и количественная оценки цвета керамических материалов / К.А. Арискина [и др.] // Вестник Технологического университета. - 2017. - Т. 20. - № 5. - С. 20-22.

134. Кириллова Н.П. Анализ цвета почв с использованием цифровой фотокамеры / Н.П. Кириллова, Т.М. Силёва // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. - 2017. - № 1. - С. 16-23.

135. Кириллова Н.П. Перевод цветowych характеристик почвы из системы Манселла в систему CIE-L\*A\*B\*/Н.П.Кириллова, Ю.Н.Водяницкий, Т.М.Силёва//Почвоведение.-2015.-№ 5.-С.527.

136. Климова Е.В. Использование анализа цифровых изображений для оценки степени потемнения картофеля после варки. (Канада) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. 2008. № 4. С. 1194.

137. Ковалев Н.Н. Цветовые формы дальневосточного трепанга *Apostichopus Japonicus* (Selenka) / Н.Н. Ковалев, С.Е. Лескова // Научные труды Дальрыбвтуза. - 2019. - Т. 50. - № 4. - С. 43-53.

138. Кожина А.И. Основы теории и практика использования количественной оценки показателей цвета в меховом производстве / А.И. Кожина, А.И. Сапожникова, А.С. Окутин // Дизайн и технологии. - 2018. - № 64 (106). - С. 23-30.

139. Коковихин А.В. Цвет, колориметрия и световая спектроскопия в судебной медицине // Проблемы экспертизы в медицине - 2007. - Т. 7. - № 2 (26). - С. 30-31

140. Колориметрическая градация выделанных шкурок лисицы красной клеточного разведения / Кожина А.И. [и др.] // Дизайн и технологии. - 2018. - № 66 (108). - С. 35-44.

141. Компьютеризированный способ определения цвета зубов / О.Л. Головков [и др.] // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. - 2004. - № 1-2. - С. 175-179.

142. Копелевич О.В. Использование биооптических параметров океана, определяемых по спутниковым данным, в качестве основных климатических переменных / О.В. Копелевич, А.Г. Костяной // Фундаментальная и прикладная климатология. - 2018. - Т. 3. - С. 8-29.

143. Криминалистический атлас цветов. // М.: ОТУ МВД СССР. - 1986.

144. Кудреватых А.А. Разработка оптических хемосенсоров для обнаружения цианид-ионов в водных средах / А.А. Кудреватых, Т.П. Мартыанов, Л.С. Клименко // Вестник Югорского государственного университета. - 2019. - № 1 (52). - С. 82-87.

145. Кузьмичева Н.А. Текстура поверхности и цвет в макроскопическом анализе листьев / Н.А. Кузьмичева, Г.Н. Бузук, Н.А. Горковчук // Вестник фармации. - 2013 - № 4 (62) - С. 17-27.

146. Кучменко Т.А. Новые инструментальные методы оценки органолептических показателей молока / Т.А. Кучменко, Д.А. Погребная, В.В. Хрипушин // Аналитика и контроль. - 2012. - Т. 16. - № 3. - С. 289-298.

147. Кушнир В.М. Индекс цвета в северо-западной части Черного моря по данным сканера MODIS / В.М. Кушнир, С.В. Станичный // Исследование Земли из космоса. - 2007. - № 4. - С. 62-73.

148. Ларионова Л.В. Особенности применения инструментальных методов для оценки натуральности пчелиного мёда / Л.В. Ларионова, Д.В. Скурихин, Л.М. Стахеева // Молодежь и наука. - 2017. - № 4-2. - С. 73.

149. Лаурэ Д.А. Разработка алгоритма измерения частоты пульса человека с помощью камеры мобильного телефона / Д.А. Лаурэ, Н.С. Лагутина, И.В. Парамонов // Моделирование и анализ информационных систем. - 2014. - Т. 21. - № 4. - С. 91-103.

150. Лезин П.А. Цветовые характеристики элементов окраски раковины *LITTORINA OBTUSATA* (GASTROPODA, PROSOBRANCHIA) и эффективность их использования при выделении фенотипических групп / П.А. Лезин, Е.В. Козминский // Зоологический журнал. - 2008. - Т. 87. - № 1. - С. 29-35.

151. Лесовская М.И. Хемилюминесцентная активность крови у практически здоровых людей // Национальная Ассоциация Ученых. - 2015. - № 2-9 (7). - С. 98-100.

152. Линейная регрессия между параметрами цвета CIE-LAB и содержанием органического вещества в почвах чайных плантаций / Ч. Йонген [и др.] // Почвоведение. - 2018. - № 2. - С. 197-202.

153. Липатов П.И. Основы антропологии с элементами генетики человека / П.И. Липатов, Л.Н. Липатова // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bio.1sept.ru/article.php?ID=200304306>, дата доступа: 10.05.2020.

154. Литвинов А.В. О необходимости цифровой стандартизации оценки цвета в практике судебно-медицинских экспертиз / А.В. Литвинов, В.И. Витер, А.Ю. Вавилов // Проблемы экспертизы в медицине. - 2013. - Т. 13. - № 3(51). - С. 33-36.

155. Литвинов А.В. Расчетный способ установления давности формирования кровоподтека на основе цифровой формализации его цвета / А.В. Литвинов, С.В. Чирков, А.Ю. Вавилов // Проблемы экспертизы в медицине. - 2014. - Т. 14. - № 4 (56). - С. 20-22.

156. Лукиных Л.М. Колориметрическая оценка изменения цвета зубов при идентификации личности / Л.М. Лукиных, М.Л. Жданова // Dental Forum. - 2008. - № 3. - С. 24-27.

157. Луценко М.Т. Хемилюминесценция и гистохимия лейкоцитов периферической крови больных бронхиальной астмой / М.Т. Луценко, И.А. Плюснина // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. - 2000. - № 7. - С. 49-54.

158. Магомедбекова М.В. Сравнительный анализ выбора оптимального метода определения цвета зубов // Международный студенческий научный вестник. / 2019. - № 5-2. - С. 28.

159. Максимов В.В. Цветовые свойства детекторов направления движения, проецирующихся в тектум карася / В.В. Максимов, Е.М. Максимова, П.В. Максимов // Сенсорные системы. - 2007. - т. 21. - № 1. - с. 19-28.

160. Мамцев А.Н. Хемилюминесценция - способ оценки антиоксидантных свойств йодобогащенных продуктов // Молочная промышленность. - 2005. - № 5. - С. 76.

161. Манин А.И. Исследование посмертных изменений цвета и прозрачности зубов / А.И. Манин, П.О. Ромодановский, Е.Х. Баринов // Медицинская экспертиза и право. - 2014. - № 4. - С. 31-33.

162. Манин А.И. Посмертные изменения цвета и прозрачности зубов и их судебно-медицинское значение / А.И. Манин, Е.Х. Баринов, П.О. Ромодановский // Судебная медицина. - 2019. - Т. 5. - № 1. - С. 16-18.

163. Математическая модель биометрических показателей растения салата (*Lactuca Sativa* L.) в светокультуре при различных дозах облучения / Ракутько С.А. [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. - 2016. - № 89. - С. 118-127

164. Математические модели оценки цветовых характеристик промышленных полимерных пленочных материалов / А.С. Разыграев [и др.] // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. - 2015. - № 3 (73). - С. 32-36.

165. Метод распознавания лиц с использованием трехмерных поверхностей / Б.А. Эчеагарай-Патрон [и др.] // Информационные процессы. - 2016. - Т. 16. - № 2. - С. 170-176.

166. Метод хемилюминесценции в индивидуальном подборе иммунокорректоров у больных папилломатозом гортани / Х.Ш. Давудов [и др.] // Российская оториноларингология. - 2008. - № 6 (37). - С. 26-30.

167. Микробиологические характеристики и цвет минимально обработанных грибов шии-таке при разной температуре хранения. (Бразилия) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал.-2011.- № 1.- С.187.

168. Минжал М.Ш. Морфометрические признаки семян некоторых видов рода IRIS L. в Саратовской области / М.Ш. Минжал, В.А. Болдырев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. - 2016. - Т. 16. - № 4. - С. 404-410.

169. Михайличенко В.Ю. Метод определения границы жизнеспособности тонкой кишки при формировании энтеро-энтероанастомоза в условиях перитонита / В.Ю. Михайличенко, Я.Я. Маслов // Вестник неотложной и восстановительной хирургии. - 2016. - Т.1. - №2. - С. 211-215.

170. Мишенькина Е.В. Возрастные особенности цветопредпочтения и взаимодействие цвета и возраста человека // Ярославский педагогический вестник. - 2005. - № 3 (44). - С. 75-78.

171. Мишин Б.С. Цвет и диагностика почв / Б.С. Мишин, Т.А. Некрасова // Наука и Образование. - 2019. - № 4. - С. 294.

172. Мониторинг аномалий цвета глаз медоносных пчел / В.Н. Саттаров [и др.] // Морфология. - 2016. - Т. 149. - № 3. - С. 181-182.

173. Морфогенетическая оценка биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения / Д.Ю. Ромашкин [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. - 2019. - Т. 23. - № 2. - С. 84-91.

174. Морфометрические показатели норок в зависимости от породы / Ходусов А.А. [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. - 2018. - № 4 (34). - С. 79-83.

175. Морфометрические показатели свойств шерсти семейства верблюдовых - уникального текстильного материала/М.В.Горбачева[и др.]//Дизайн и технологии-2016.-№ 54 (96)-С.67-73.

176. Набокина Ю.А. Роль цвета в проектировании одежды и его влияние на ощущения человека // Новая наука: От идеи к результату. - 2017. - Т. 2. - № 2. - С. 164-170.

177. Назаренко С.Н. Показатели качества поверхностных вод реки Псел бассейна Днепра // Ученые записки учреждения образования Витебская ордена Знак почета государственная академия ветеринарной медицины. - 2014. - Т. 50. - № 1-1. - С. 192-195.

178. Нейротрансмиттеры как универсальные регуляторы онтогенеза: рецепция и механизмы сопряжения со вторичными мессенджерами/ Г.А. Бузников [и др.]//Информационный бюллетень РФФИ. Биология, Медицинская наука - 1996 - 4

179. Нилова Л.П. Влияние СВЧ-нагрева на оптические характеристики ягодных экстрактов / Л.П. Нилова, Р.А. Икрамов, С.М. Малютенкова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2019. - Т. 81. - № 1 (79). - С. 218-224.

180. Новиков А.И. Исследование спектрометрических параметров семенной кожуры сосны обыкновенной в ИК-диапазоне / А.И. Новиков, В.В. Саушкин // Лесотехнический журнал. - 2018. - Т. 8. - № 3 (31). - С. 6-15.

181. Новиков В.В. Действие слабых магнитных полей на хемилюминесценцию крови человека / В.В. Новиков, Е.В. Яблокова, Е.Е. Фесенко // Биофизика. 2016. Т. 61. № 1. С. 126-130.

182. Нужнова О.К. Влияние цветовых предпочтений на трофическое поведение брюквенницы (PIERIS NAPI L.) / О.К. Нужнова, Н.В. Василевская // Сибирский экологический журнал. - 2013. - Т. 20. - № 1. - С. 61-67.

183. Об итогах тестирования хлопкового волокна с применением макета национальной диаграммы цвета / Р.А. Гуляев [и др.] // Механика и технологии. 2014. - № 3 (45). - С. 40-45.
184. Определение видового состава антоцианов цветков CATHARANTHUS / Дейнека В.И. [и др.]// Аналитика и контроль. - 2019. - Т. 23. - № 1. - С. 103-109.
185. Оценка зон цветения фитопланктона на Красноярском водохранилище на основе спутниковых данных AVHRR И MODIS // М.Ю. Чернецкий [и др.] // Исследование Земли из космоса. - 2006. № 2. - С. 89-96.
186. Оценка цвета почв в полевых условиях с использованием прибора GRETAG MACBETH EYE-ONE PHOTO / Р.Ф. Байбеков [и др.] // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. - 2007. - № 4. - С. 23-28.
187. Ощепков В.Г. Хемилюминесценция иммунокомпетентных клеток крови и ее использование для диагностики туберкулеза / В.Г. Ощепков, Г.М. Дюсенова // Омский научный вестник. - 2007. - № S3-2 (61). - С. 339-340.
188. Панкратов О.В. Патология ногтей - индикатор общих или кожных заболеваний. Часть 2 / О.В. Панкратов, Р.Ю. Шикалов, В.Г. Панкратов // Здоровоохранение (Минск). -2016. - №5. - С.45-49.
189. Паньковский Г.А. Системная оценка качества экструдированных гороховых палочек // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. - 2004.-№ 4. -С. 1401.
190. Первая цветометрическая характеристика донных отложений Чукотского моря / А.Н. Колесник [и др.] // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 487. - № 4. - С. 448-454.
191. Перспективы использования цифровой цветометрии в контроле цветности растительных масел при их рафинации // О.В. Перегончая [и др.] Агропромышленные технологии Центральной России. 2019. - № 4 (14) -С. 29-38.
192. Петренко Е.В. Эволюционные основы морфогенеза // Бюллетень науки и практики. - 2019. - Т. 5. - № 3. - С. 40-57.

193. Платов Ю.Т. Инструментальная спецификация цветовых характеристик строительных материалов / Ю.Т. Платов, Р.А. Платова // Строительные материалы. - 2013. - № 4. - С. 66-72.

194. Пожарский А.О. Оценка цветового охвата системы печати посредством объема тела охвата цветов, вычисленного с учетом неоднородности цветового пространства / А.О. Пожарский, И.А. Сысуев // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. - 2006. - № 4. - С. 3-12.

195. Полянский В.Б. Школа Е.Н. Соколова и психофизиологические исследования на животных // Вестник Московского Университета. - Серия 14: Психология. - 2010. - № 4. - с. 140-148.

196. Попов П.П. Фотоколориметрическая оценка семян ели // Лесоведение.-2005.- № 4. - С. 78-80.

197. Портативный цветовой анализатор качественных изменений мяса птицы / И.Г. Пальчикова [и др.] // Достижения науки и техники АПК. - 2015. - Т. 29. - № 9. - С. 80-83.

198. Прижизненные методы контроля фаго- и пиноцитоза на модели пищеварения планарий / Х. П. Тирас [и др.] // Сборник трудов Международной научной конференции «Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности» (SCVRT2018): материалы конф. - М., Протвино, Институт физико-технической информатики, 2018. - с. 347-359.

199. Применение компьютерных технологий для изучения цвета радужки в антропологии/А.А. Дорофеева [и др.]//Морфология.-2010.-Т.137.-№ 2.-С.71-76.

200. Проблемы восприятия и оценки цвета в судебной медицине / А.Д. Бирючевский [и др.] // Проблемы экспертизы в медицине. - 2009. - Т. 9. - № 2-3 (34-35). - С. 37-39.

201. Простой метод анализа двумерных цветных изображений листьев растений Шимои Х. [и др.] // Физиология растений. - 2006.- Т. 53.- № 1. - С. 139-147.

202. Профессиональное отбеливание зубов. аспекты цвета / Ю.С. Высочанская [и др.] // Институт стоматологии. - 2015. - № 2 (67). - С. 38-39.

203. Психология цвета в дизайне интерьера / Т.Н. Архипова [и др.] // Социально-гуманитарные технологии. - 2019. - № 1 (9). - С. 41-46.
204. Разживина Г.П. Психофизиологическое воздействие цвета и света на человека / Г.П. Разживина, Е.В. Землянская // Образование и наука в современном мире. Инновации. - 2019. - № 1 (20). - С. 257-261
205. Разработка мультимедийных приложений с использованием библиотек OPENCV и IPP / А.В. Бovyрин [и др.] // М.: ИНТУИТ, 2016 – 515 с.
206. Распознавание пола дрозофилы по фотоизображениям / Л.М. Местецкий [и др.] // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. - 2019. - № 4. - С. 80-84.
207. Ремизова М.В. Шаг вверх, два шага вниз: порядок заложения органов цветка // Онтогенез. - 2019. - Т. 50. - № 6. - С. 407-423.
208. Румянцев А.А. Определение цвета крупы и муки в цифровом режиме RGB / А.А. Румянцев, Р.Ф. Ярмиев // Молодежь и наука.- 2018.- № 1.- С.34, С.57.
209. Рунков С.И. Цвет неоплейстоценовых морен на территории Мордовии / С.И. Рунков, В.Н. Маскайкин // Современные проблемы территориального развития. - 2019. - № 2. - С. 11.
210. Салинг И.В. Оценка взаимосвязи между биооптическими параметрами вод поверхностного слоя в разных регионах Каспийского моря по данным спутниковых сканеров цвета / И.В. Салинг, О.В. Копелевич // Труды международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». - 2015. - Т. 8. - С. 129-133.
211. Салюк П.А. Проблемы спутникового зондирования цвета океана при исследовании климатообразующих процессов // Труды международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод».-2015.-Т.8.-С. 40-45.
212. Сичевский С.Г.Метод определения параметров звезд на основе их многоцветной фотометрии // Астрономический журнал. 2012.-Т.89.-№ 9. - С. 787.
213. Собственная хемилюминесценция необластов планарии в процессе регенерации / Х.П. Тирас [и др.] // - Биофизика. - 2015. - Т. 60. - № 5. - С. 975-980.

214. Содержание каротиноидов в плодах некоторых представителей рода *SORBUS L.* при интродукции / Абдуллина Р.Г. [и др.]// Химия растительного сырья. - 2020. - №1. - С.229-235.

215. Соотношение цвета и химического состава четвертичных донных осадков из южной части поднятия Менделеева и континентального склона Восточно-Сибирского моря / М.А. Левитан [и др.] // Геохимия.-2014. - № 3. - С. 233.

216. Спирина Т.К. Оценка качества сухофруктов // Молодежь и наука. - 2016 - № 1 - С. 71.

217. Сравнительная оценка визуального и колориметрического методов определения цвета зубов/А.В.Севбитов [и др.]//Dental Forum.-2015.-№1.-С.19-20.

218. Сравнительные оценки характеристик кокколитофоридных цветений в Баренцевом и Черном морях по данным спутниковых сканеров цвета / Копелевич О.В. [и др.] // Труды международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». -2015. - Т. 8. - С. 31-35.

219. Статистический анализ изображений макро- и микропрепаратов ткани легких и кишечника у больных вич-инфекцией на стадии вторичных заболеваний / Д.Д. Арутюнова [и др.] // Русский медицинский журнал. Медицинское обозрение. - 2019. - Т. 3. - № 9-1. - С. 38-42.

220. Судник Ю.А. Способ определения зрелости томатов на основе контроля их индукции флуоресценции хлорофилла / Ю.А. Судник, Абделхамид М. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". - 2020. - № 1 (95). - С. 51-54.

221. Сюткин В.Н. Фотометрический метод определения диоксинов // Твердые бытовые отходы. - 2007. - № 10 (16). - С. 28-29.

222. Тирас Х.П. Регуляция стволовых клеток планарий физическими и химическими факторами / Х.П. Тирас // В сборнике: труды международной научной конференции СРТ2015 Международная научная конференция Московского физико-технического Института (государственного университета) Института

физико-технической информатики. Институт физико-технической информатики. - 2016. - с. 14-39.

223. Тихонюк А.В. Повышение стабильности контроля цветности сахара-песка экспресс-методом / А.В. Тихонюк, Л.И. Дадеко, Л.С. Клименко // Сахар. - 2010. - N 10. - С. 48-49.

224. Ткаль В.А. Применение компьютерных технологий для исследования изменений цвета колбасных изделий / В.А. Ткаль, А.О. Окунев, А.В. Шараева // Мясная индустрия. - 2007. - № 9. - С. 34-37.

225. Токарчук Е.Ю. Цвет как многоаспектное явление в жизни человека / Е.Ю. Токарчук, Г.Т. Солтанова // Инженерно-педагогический вестник: легкая промышленность. // 2018. - № 4 - (7). - с. 49-55.

226. Томашевич И.Б. Система компьютерного зрения для измерения цветовых параметров мяса и мясных продуктов: обзор // Theory and Practice of Meat Processing. - 2018. - Т.3. - № 4. -С. 4-15.

227. Тринеева О.В. Исследование каротиноидного состава плодов облепихи крушиновидной различных сортов методом тонкослойной хроматографии / О.В. Тринеева, М.А. Рудая, А.И. Сливкин // Химия растительного сырья. - 2020. - № 1. - С. 223-228.

228. Тринеева О.В. Применение люминесцентной микроскопии в анализе анатомо-диагностических признаков плодов облепихи крушиновидной / О.В. Тринеева, А.А. Гудкова, М.А. Рудая // Разработка и регистрация лекарственных средств. - 2020. - Т. 9. - № 1. - С. 40-45.

229. Федосеева Г.А. Разнообразие окраски опушения у хорьков // Достижения науки и техники АПК. - 2012. - № 4. - С. 53-57.

230. Физическая антропология. Иллюстрированный толковый словарь. Шкала Лушана [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://es.niv.ru/doc/dictionary/physical-anthropology/fc/slovar-216.htm>, дата доступа: 15.05.2020.

231. Хабибуллин Р.Р. Теоретические и практические аспекты процесса люминол-зависимой хемилюминесценции в живых организмах / Р.Р. Хабибуллин, А.В. Федосов // Башкирский химический журнал. - 2006.- Т.13. -№ 2. - С.106-107.
232. Харитонов С.П. Манипуляционно-исследовательская активность у морских птиц: поведенческая реакция на предъявленные на колонии искусственные объекты // Зоологический журнал. 2018. - Т. 97. - № 4. - С. 426-443.
233. Хохлачева Ю.А. Оценка фактуры поверхности травянистых растений // Лесотехнический журнал. - 2012. - № 1 (5). - С. 34-42.
234. Цвет в промышленности / Под ред. Р. Мак-Дональда. – Пер. с англ. под ред. Ф.Ю. Телегина. – М.: Логос, 2002. – 596 с.
235. Цвет волос [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://gufo.me/dict/biological\\_anthropology/%D0%A6%D0%B2%D0%B5%D1%82\\_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%81](https://gufo.me/dict/biological_anthropology/%D0%A6%D0%B2%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%81), дата доступа 11.05.2020.
236. Цветовой анализ цифровых изображений при производстве экспертных исследований следов выстрела / И.Г. Пальчикова [и др.] // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2015. - № 2 (27). - С. 88-101.
237. Цветовые характеристики зерна озимой твердой пшеницы / Штейнберг Т.С. [и др] // Вестник ВСГУТУ. - 2018. - № 3 (70). - С. 67-74.
238. Ципящук Б.А. Восприятие цвета человеком / Бюллетень медицинских интернет-конференций // 2017. - Т. 7. - № 6. - С. 1065.
239. Цифровая видеосистема для определения и анализа цветовых характеристик мясного сырья. / А.Ф. Алейников [et al] // Сиб. Вестн. С.-х. науки. - 2013. - N 1. - С. 78-88.
240. Цифровая морфометрия семян овощных культур / Ф.Б. Мусаев [и др.] // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. - 2019. - № 12 (12). - С. 176-182.
241. Цур-Царь Д.А. Оценка качества кетчупа / Цур-Царь Д.А., Хатанов К.Ю. // Молодежь и наука. - 2017. - № 5. - С. 38.
242. Червяк С.Н. Оценка цвета розовых вин с помощью системы CIELAB // Плодоводство и виноградарство Юга России. - 2020. - № 62 (2). - С. 113-121.

243. Чернодубов А.И. Наследование цвета семенной кожуры потомствами сосны обыкновенной // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2001. - № 3. - С. 134-136.

244. Черноусова О.В. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа / О.В. Черноусова, О.Б. Рудаков // Химия, физика и механика материалов. - 2019. - № 2 (21). - С. 55-125.

245. Чумакова А.М. Спектрофотометрические данные по цвету кожи бедуинов южного Синая (по материалам экспедиции Тель-Авивского университета 1979-1982 гг.) / А.М. Чумакова, Е.Д. Кобылянский // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология.-2014. - № 1. - С. 102-106.

246. Шилко Н.С. Особенности использования цветов при изображении своих внутренних образов у людей с психическими расстройствами / Н.С. Шилко, М.А. Омельченко, Е.М. Иванова // Социальные трансформации. - 2019. - № 30. - С. 225-231.

247. Штрайхерт Е.А. Сезонные и суточные распределения показателей содержания фитопланктона, органического вещества, взвеси в Амурском заливе и прилегающей области по спутниковым данным / Е.А. Штрайхерт, С.П. Захарков // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. - 2018. - № 1 (197). - С. 102-109.

248. Эрман Е.А. Метод обнаружения лиц на изображении с использованием комбинации метода Виолы - Джонса и алгоритмов определения цвета кожи / Е.А. Эрман, Мохаммед Гомаа Мохаммед Мамдух // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 1. С. 49-55.

249. Юсупов Г.А. Влияние света на антоцианы яблок / Г.А. Юсупов, Б.А. Сауир // Theoretical & Applied Science. - 2015. - № 12 (32). - С. 122-125.

250. Яржомбек А.А. Красный и оранжевый цвет покровов рыб / А.А. Яржомбек, К.А. Жукова // Труды ВНИРО. - 2018. - Т. 170. - С. 72-77.

251. Яркость RGB компонент фотоизображения образцов крови, освещенной специально фильтрованным световым потоком / Дубровский В.А. [и др.] // Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2013. - Т. 3. - № 3. - С. 643.

252. Ястребова О.Г. Особенности восприятия цвета в ландшафте // Вестник ландшафтной архитектуры. - 2013. - № 2. - С. 103-106.