

ОБЗОР

УДК 577.354



Памяти Хачатура Сергеевича Коштоянца

Молекулярный механизм адаптации к световой среде обитания: к вопросу о спектральной настройке зрительных пигментов двух популяций креветок *Mysis relicta* (Crustacea: Mysidacea)

М.А. Островский^{1,2}¹Кафедра молекулярной физиологии, биологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12;²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, Российская академия наук, Россия, 119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4
e-mail: ostrovsky3535@mail.ru

В статье рассматриваются световая среда обитания двух популяций креветок вида *Mysis relicta* (Crustacea: Mysidacea) и молекулярный механизм спектральной настройки их зрительных пигментов. Представлены данные, согласно которым спектральная настройка основана на экспрессии генов разных опсинов, а не на замене хромофорных групп: ретиналь-1 (A1) ↔ ретиналь-2 (A2).

Ключевые слова: зрение, родопсин, спектральная настройка, ракообразные, сравнительная физиология

DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-79-2S-2

Введение

Два тесно переплетавшихся направления — сравнительная и эволюционная физиология и «энзимохимия нервного возбуждения» составляли суть школы Х.С. Коштоянца. Школа эта оказала сильнейшее влияние на ее воспитанников, в том числе и на меня. Моя первая научная публикация касалась сравнительной физиологии беспозвоночных, а именно двигательной активности актиний *Actinia equina* приливно-отливной зоны Баренцева моря [1]. Работу эту я выполнял, будучи второкурсником, на Биологической станции Академии наук СССР в Дальних Зеленцах. Еще до публикации самой статьи Х.С. Коштоянц включил мой результат с оригинальной записью двигательной активности актинии во второй том своего фундаментального труда — «Основы сравнительной физиологии. Сравнительная физиология нервной системы» 1957 года (стр. 210–211) (рис. 1) [2]. Много лет спустя я вернулся к сравнительной физиологии. Это была сравнительная физиология зрения ракообразных. Сначала на биостанции Академии наук СССР «Витязь» на Дальнем Востоке мы исследовали спектральную чувствительность и зрительные пигменты прибрежного краба *Hemigrapsus sanguineus* [3].

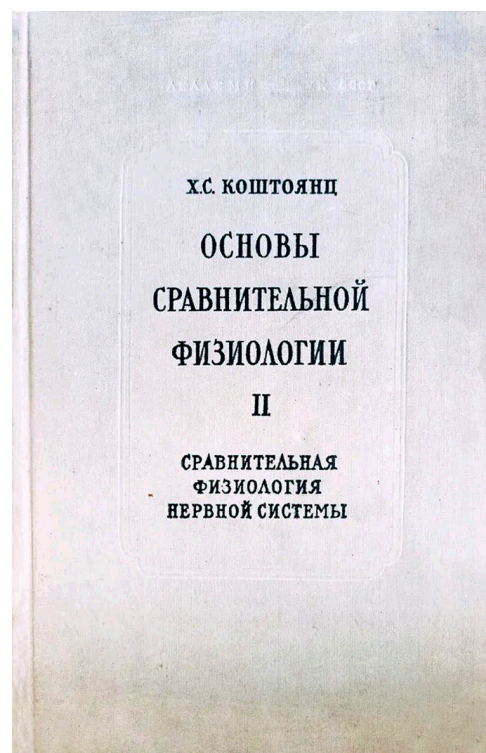


Рис. 1. Титульный лист II тома фундаментального труда Х.С. Коштоянца «Основы сравнительной физиологии. Сравнительная физиология нервной системы».

А затем, в самом конце 80-х—начале 90-х гг. началось наше более чем тридцатилетнее сотрудничество с группой физиологов Хельсинского университета, возглавлявшейся сначала профессором Кай-Отто Доннером, в то время Президентом Академии наук Финляндии, а после его кончины сыном, профессором Кристианом Доннером. Целью было исследование механизмов адаптации зрения беспозвоночных к меняющимся условиям световой среды обитания. Объектом исследования были две популяции креветок *Mysis relicta* (Crustacea, Mysidae) — озерной и морской; их зрительные и экранирующие пигменты. Эта предложенная Кай-Отто Доннером экспериментальная модель — две популяции креветок одного и того же вида — оказалась для нас чрезвычайно удачной. Основные результаты этого сотрудничества опубликованы в цикле работ [4–11].

В настоящей статье обсуждается один из вопросов этого многолетнего исследования. Речь идет о молекулярном механизме спектральной настройки зрительных пигментов родопсинов у озерной и морской популяций креветок *Mysis relicta*. Полученные в этом отношении в самое последнее время данные меняют наши первоначальные представления о механизме такой настройки.

Креветки *M. relicta* как объект для исследования механизмов адаптации к световой среде обитания

Эволюционная и сравнительная физиология зрительных пигментов — увлекательная и непреходяще актуальная область биологии [12–16]. Механизмы адаптации к световой среде обитания — одна из ее проблем. Род ракообразных *Mysis* можно рассматривать как исключительно удобную модель для исследования «быстрого» адаптационного ответа на изменение как условий освещенности среды обитания, так и других экологических факторов, например, солености. Мизиды неоднократно меняли среду обитания как на межвидовом, так и внутривидовом уровнях. Причем меняли за разные периоды времени — от миллионов лет до всего нескольких тысячелетий. Адаптацию к смене среды обитания в течение нескольких тысячелетий следует рассматривать как «быструю» адаптацию.

Морская и озерная популяции вида *M. relicta* разделились сравнительно недавно — в конце ледникового периода, всего около 10 тыс. лет назад. В пресных и малопрозрачных водах, содержащих различного рода взвеси, уже на сравнительно небольшой глубине света доходит мало, при этом в силу спектральной фильтрации свет смещен в длинноволновую область спектра. На рис. 2 представлено нормированное спектральное распределение света в море (Роё, залив Балтийского моря) и в глубоководном озере Рääjärvi Финляндии, откуда мы добывали креветок для наших экспериментов. В морском заливе креветки обитают

на сравнительно небольшой глубине, в озере — на достаточно большой глубине, куда света доходит, можно сказать, ничтожное количество. Как видно, различие в спектральном составе света весьма впечатляющее. Поэтому, если говорить об адаптации к световой среде обитания, то спектры поглощения зрительных пигментов должны быть разнесены: у озерных креветок максимум спектра должен быть смещен в длинноволновую область, а у морских — в коротковолновую.

Следует отметить при этом, что у озерных креветок экранирующие пигменты не должны мешать доступу света к родопсину в их омматидиях. Как выяснилось, так оно и есть: концентрация экранирующих пигментов оммохромов в глазах креветок озерной популяции почти вдвое ниже, чем в глазах морской [4]. Однако значительная потеря экранирующих пигментов в глазах креветок озерной популяции становится одной из причин их исключительной чувствительности к световому повреждению, поскольку оммохромы, как мы показали, обладают выраженными антиоксидантными свойствами [17, 18]. Действительно, даже умеренное вечернее освещение на поверхности воды приводит у этой популяции креветок к полной потере зрения [19]. Вместе с тем, падение в концентрации экранирующих пигментов в ходе адаптации глаза к глубоководному образу жизни можно также рассматривать как один из эффективных механизмов приспособления к световой среде обитания, способствующий максимальному «улавливанию» квантов света в условиях чрезвычайно низкой освещенности. Достаточно же высокая концентрация оммохромов в глазах морской популяции, обитающей на небольшой глубине в условиях хорошей освещенности, — важный адаптационный фактор, ответственный за их устойчивость к свету.

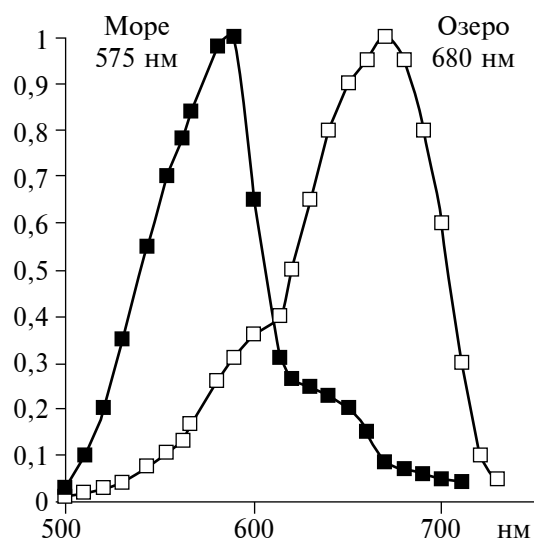


Рис. 2. Спектральное распределение света в заливе Роё Балтийского моря и в глубоком озере Рääjärvi в Финляндии.

Зрительную адаптацию к различному спектральному составу света в море и в глубоководных озерах в значительной мере обеспечивает длинноволновый спектральный сдвиг. Он отчетливо проявляется у озерных популяций северных видов мизид, претерпевших более чем двухмиллионный период эволюции и дивергенцию опсинового гена. Действительно, у всех изученных озерных родственных мизид финно-скандинавских видов — *M. relicta*, *M. salemaai* и *M. segerstralei* — спектр поглощения доминирующего зрительного пигмента сдвинут примерно на 20–30 нм в длинноволновую (красную) область по сравнению с креветками морских популяций этих же видов [20].

При этом следует подчеркнуть, что по сравнению со спектрами поглощения зрительных пигментов в рабдомимах, спектральная чувствительность глаза мизид еще дальше сдвинута в красную область спектра. Сдвинута она благодаря экранирующим пигментам, значительно ослабляющим свет в синей области спектра. По нашим данным, длинноволновый сдвиг спектральной чувствительности глаза обеспечивается вкладом желтых экранирующих пигментов: одним из оммохромов — ксантоматином и каротиноидами, поглощающими свет в синей области спектра [7]. При этом, несмотря на фильтрацию, разница в спектральной чувствительности озерных и морских популяций креветок, соответственно в длинно- и коротковолновой областях спектра, сохраняется. Иными словами, по сравнению с морской, спектральная чувствительность глаза озерной популяции смещена примерно на 30 нм в красную область спектра.

Механизм спектральной настройки зрительного пигмента у морской и озерной популяций креветок *M. relicta*

В принципе, спектральная настройка зрительных пигментов возможна в двух временных шкалах: длительной эволюционной и сравнительно краткосрочной, адаптационной — физиологической. Первая связана с аминокислотными заменами в хромофорном центре белковой части молекулы — опсине, вторая — в основном с хромофорной группой, ретиналем. Что касается аминокислотных замен, то, например, сдвиг спектра поглощения «ультрафиолетового» пигмента в фиолетово-синюю область требует в хромофорном центре опсина всего одной аминокислотной замены [21]. Механизмы «быстрой» адаптационной настройки весьма разнообразны. Основной и самый «быстрый» внутримолекулярный механизм спектральной настройки — это замена хромофора: ретиналя-1 (хромофора A1) на ретиналь-2 (хромофор A2) в том же самом опсине (рис. 3). Замена ретиналя-1 на ретиналь-2, имеющий добавочную двойную связь в бета-иононовом кольце молекулы, приводит к длинноволновому смещению максимума спектра поглощения примерно на 30 нм [22]

и является одним из основных внутримолекулярных механизмов «быстрой» спектральной настройки. Именно переходы A1 ↔ A2 (родопсин ↔ порфиросин) обеспечивают «быструю» адаптацию к световой среде обитания — сезонную настройку спектральной чувствительности глаза у рыб и амфибий [23, 24]. Такой же переход A1 ↔ A2 известен, по крайней мере, у одного вида ракообразных — у пресноводных крабов, у которых баланс между двумя формами хромофоров зависит от факторов окружающей среды, в первую очередь света и температуры [25].

Внутримолекулярный механизм спектральной настройки обеспечивается взаимодействием ретиналя в хромофорном центре опсина с близлежащими аминокислотными остатками в ближайшем белковом окружении. Ковалентная, протонированная, положительно заряженная связь альдегидной группы ретиналя с лизиновым остатком опсина позволяет осуществлять смещение максимума спектра поглощения молекулы зрительного пигмента во всем видимом и частично ближнем ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda_{\max} \approx 380\text{--}700$ нм). При наличии такой ковалентной связи спектральная настройка происходит благодаря электростатическому взаимодействию ретиналя с конкретными аминокислотными остатками в хромофорном центре опсина (для обзора см. [26]). Это ярко иллюстрирует сайт-направленный мутагенез, когда разные мутанты одной и той же молекулы с аминокислотными заменами имеют разные спектры поглощения [27].

Таким образом, возвращаясь к двум популяциям одного и того же вида креветок *M. relicta*, очевидно, что если спектры поглощения родопсина у них различаются, то это может зависеть или от природы хромофора — замены ретиналя-1 (A1) на ретиналь-2 (A2), или от отличающихся опсинов. Естественно было предположить, что если речь идет о «быстрой» адаптационной настройке (всего 10 тысяч лет!), то можно ожидать замены ретиналя-1 у морской популяции на ретиналь-2 у озерной.

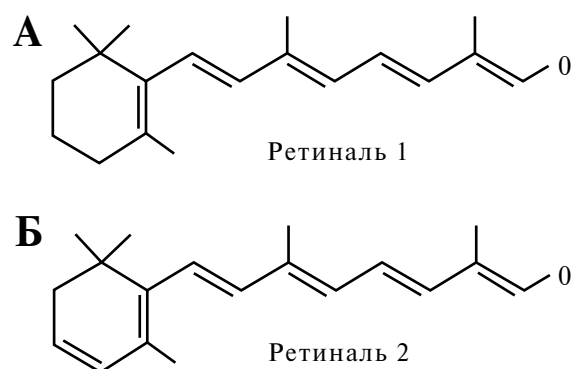


Рис. 3. Структурные формулы: (А) ретиналя-1 и (Б) ретиналя-2, имеющего добавочную двойную связь в бета-иононовом кольце.

Используя технику микроспектрофотометрии отдельных рабдомов глаза морской и озерной популяций *M. relicta*, в сериях экспериментов, выполненных нами в течение нескольких сезонов, было показано, что спектры поглощения родопсина популяций отличаются (рис. 4). Максимум спектра поглощения родопсина морских креветок находится в области 530 нм, а у обитающей на достаточно большой глубине озерных — в области 560 нм [5, 7]. В работе [5] нами было сделано предположение, что разница в положении спектров поглощения связана с разными хромофорами —

ретиаль-1 (A1) у морских и ретиаль-2 (A2) у озерных.

Следующим шагом была проверка этого предположения. Используя метод высокоэффективной жидкостной хроматографии, нами было четко показано, что различия в спектрах поглощения родопсина в глазах озерной и морской популяций *M. relicta* не связаны с использованием различных форм хромофоров — и у тех, и у других хромофором оказался 11-цис изомер ретиналя-1 (A1); хромофор ретиаль-2 (A2) у них отсутствовал (рис. 5) [9]. Это был довольно

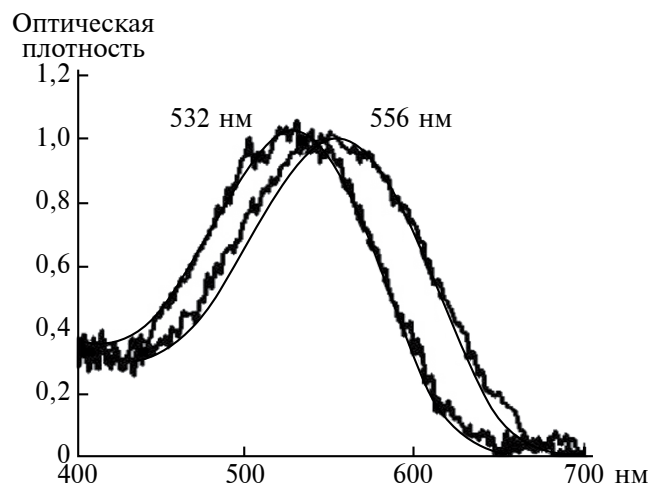


Рис. 4. Микроспектрофотометрическая регистрация спектров поглощения одиночных рабдомов глаза *Mysis relicta*. Слева — спектр поглощения рабдома морской популяции из залива Рого Балтийского моря. Справа — спектр поглощения рабдома озерной популяции из озера Раяярви в Финляндии. Рисунок адаптирован из работы [7].

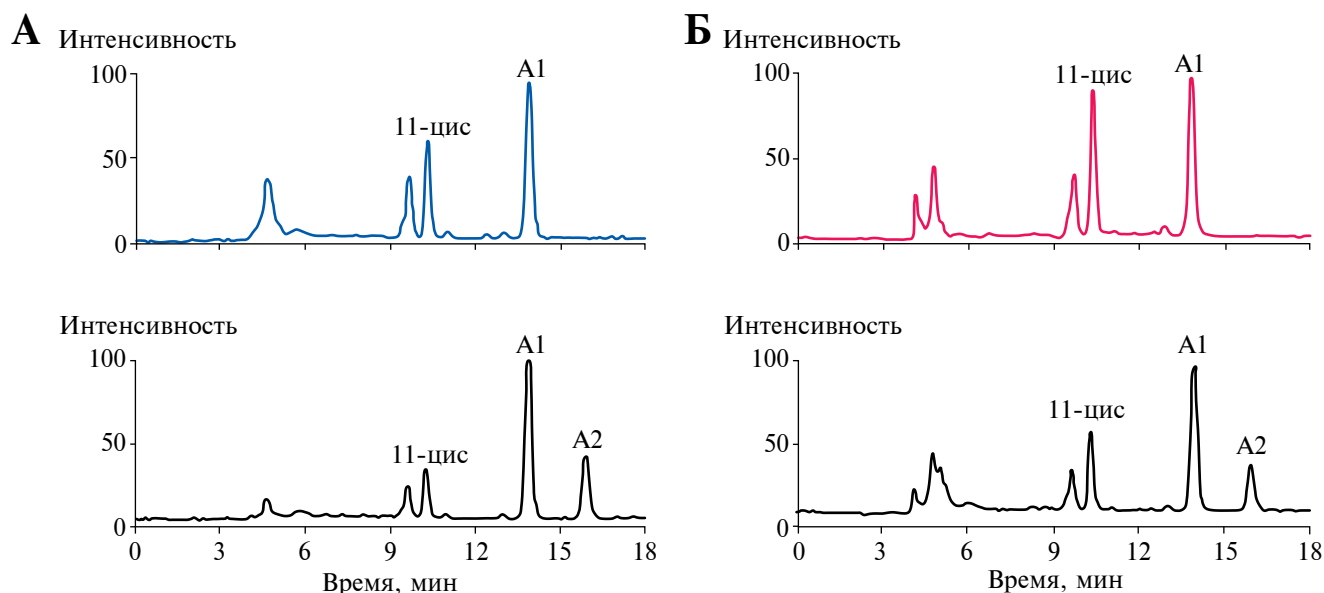


Рис. 5. Сравнительный хроматографический (высокоэффективная жидкостная хроматография) анализ экстрактов ретиналя из глаз морской и озерной популяций *Mysis relicta*. Рисунок адаптирован из работы [9].

(А) Морская популяция. Верхняя хроматограмма: экстракт ретиналя из глаз креветок морской популяции. Нижняя хроматограмма: смесь экстракта ретиналя из глаз и стандартов — синтетических ретиналя-1 (A1) и ретиналя-2 (A2). Видно, что в экстракте (верхняя хроматограмма) ретиаль-1 (A1) присутствует, а ретиаль-2 (A2) отсутствует.

(Б) Озерная популяция. Верхняя хроматограмма: экстракт ретиналя из глаз креветок озерной популяции. Нижняя хроматограмма — смесь экстракта ретиналя из глаз и стандартов — синтетических ретиналя-1 (A1) и ретиналя-2 (A2). Видно, что в экстракте (верхняя хроматограмма) ретиаль-1 (A1) присутствует, а ретиаль-2 (A2) также отсутствует.

неожиданный результат. Объяснение, которое мы ему дали (и оно остается справедливым), состоит в том, что мизиды — это исходно морские ракообразные, а не пресноводные. А для морских ракообразных характерен именно ретиналь-1 (A1) в качестве хромофора. Это подтверждали и наши собственные данные, полученные на морском дальневосточном прибрежном крабе *Hemigrapsus sanguineus* [3]. И хотя мизиды меняли, притом неоднократно, среду обитания с морской на пресноводную и обратно, биохимическая система обмена $A1 \leftrightarrow A2$ у них так и не появилась. Иными словами, будучи исходно морскими ракообразными, мизиды, приспосабливаясь к световой среде обитания, не использовали обмен $A1 \leftrightarrow A2$ для изменения спектральной чувствительности глаза.

Поскольку у озерной и морской популяций *M. relicta* хромофором зрительного пигмента оказался 11-цис изомер ретиналя-1 (A1), то, следовательно, у них должны отличаться опсины. Однако попытки найти у них различия между опсинами не увенчались успехом. Конкретно, в работе [20], не было найдено разницы в гене опсина, кодирующего аминокислотную последовательность родопсина в рабдомах озерной и морской популяций *M. relicta*. В то же время, при сравнении трех различных видов мизид — *M. relicta*, *M. salemaai* и *M. segerstralei* — различия генов опсина между видами в этой же работе [20] найдены были. Таким образом, вопрос о природе различия спектров поглощения родопсинов в двух популяциях одного и того же вида *M. relicta*, что называется, «повисал в воздухе». И только совсем недавно, в докладе Кристиана Доннера и сотрудников, сделанном на симпозиуме «VISIONARIUM XXI, 2023», впервые были представлены результаты, свидетельствующее о том, что у озерной и морской популяций *M. relicta* экспрессируется не один, а как минимум два гена опсинов [28]. Интересно при этом, что тот единственный ген опсина *M. relicta*, который был описан в работе [20], Доннером и сотрудниками вообще не был найден, но были экспрессированы другие, потенциальные гены опсинов. Как пишут сами авторы: «Дифференциальная экспрессия двух или более генов опсина может объяснить спектральную адаптацию в физиологическом масштабе времени у *M. relicta*, хотя контролирующий фактор среды остается неизвестным».

Итак, обнаруженное нами различие в положении максимумов спектра поглощения зрительных пигментов морских и озерных креветок *M. relicta* объясняется не различием хромофоров — у обеих популяций обнаруживался один и тот же хромофор — ретиналь-1 (A1), а различием опсинов. Вопрос о том, какой фактор среды вовлечен в «бы-

струю» зрительную адаптацию разделившихся всего 10 тыс. лет назад, в постледниковый период, двух популяций одного и того же вида креветок *M. relicta*, остается открытым. Крайне интересен и требует дальнейших исследований механизм, обеспечивающий преимущественную экспрессию гена того или иного опсина у озерной и морской популяций.

В свете новых данных об экспрессии двух или более генов опсина разумное объяснение получают результаты, полученные нами в свое время в микроспектрофотометрических и электрофизиологических экспериментах [8]. Суть результатов этих взаимодополняющих экспериментов состояла в том, что в рабдомах глаза каждой из популяций *M. relicta*, причем в разных рабдомах, присутствуют оба зрительных пигмента — и средневолновый (зеленый, 525–530 нм), и длинноволновый (красный, 565–570 нм), но присутствуют, при этом, в существенно разных пропорциях. В глазах озерных креветок имеется гораздо больше длинноволновых (красночувствительных) рабдомов (порядка 80%), содержащих зрительный пигмент с максимумом спектра поглощения $\lambda_{\max} \sim 560$ нм. Популяция же средневолновых (зеленочувствительных) рабдомов, содержащих зрительный пигмент с максимумом спектра поглощения $\lambda_{\max} \sim 530$ нм, намного меньше — порядка 20%. Имевшиеся в то время данные о наличии у *M. relicta* только одного опсина никак не укладывались в эти результаты. Обнаруженная же группой Доннера экспрессия двух или более генов опсинов в глазах *M. relicta* позволяет понять, почему в рабдомах каждой из популяций нами обнаруживались оба — и длинно- и средневолновые зрительные пигменты [8].

Таким образом, отличие спектров поглощения родопсина у озерной и морской популяций одного и того же вида креветок *M. relicta* связано не с разными хромофорами, а, судя по всему, с заменами аминокислотных остатков в хромофорном центре разных опсинов. Вопросы о том, какие именно это замены и каковы «сигналы» для столь «быстрой» адаптационной настройки спектров поглощения зрительных пигментов, коррелирующей со спектральным составом света среды обитания, остаются открытыми.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №. 122041400102-9). Работа проведена без использования животных и без привлечения людей в качестве испытуемых. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Островский М.А., Смирнова Н.А. О длительной периодической активности морских анемонов. *Научные доклады высшей школы. Биологические науки*. 1959;1:56–59.
2. Коштыянец Х.С. *Основы сравнительной физиологии. Часть 2. Сравнительная физиология нервной системы*. Изд. АН СССР; 1957. 636 с.
3. Шуколюков С.А., Зак П.П., Каламкаров Г.Р., Калишевич О.О., Федорович И.Б., Островский М.А. Спектральная чувствительность и зрительные пигменты прибрежного краба *Hemigrapsus Sanguineus*. *Биофизика*. 1980;25(3):510–514.
4. Dontsov A.E., Fedorovich I.B., Lindström M. Comparative study of spectral and antioxidant properties of pigments from the eyes of two *Mysis relicta* (Crustacea, Mysidacea) populations, with different light damage resistance. *J. Comp. Physiol. B*. 1999;169(3):157–164.
5. Jokela-Määttä M., Pahlberg J., Lindström M., Zak P., Porter M., Ostrovskii M., Cronin T., Donner K. Visual pigment absorbance and spectral sensitivity of *Mysis relicta* (Crustacea, Mysidae) in different light environments. *J. Comp. Physiol. A*. 2005;191(12):1087–1097.
6. Feldman T., Yakovleva M., Lindström M. Eye adaptation to different light environment in two populations of *Mysis relicta*: A comparative study of carotenoids and retinoids. *J. Crustac. Biol*. 2010;30(4):636–642.
7. Абу Хамидах А.Е., Демчук Ю.В., Зак П.П., Линдстром М., Островский М.А. Коротковолновая световая фильтрация в формировании спектральной чувствительности двух популяций креветок *M. relicta* (Mysida). *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16. Биол.* 2010;(2):9–14.
8. Зак П.П., Линдстрем М., Демчук Ю.В., Доннер К., Островский М.А. Глаза креветок *Mysis relicta* (Crustacea, Mysidae) содержат два вида зрительных пигментов, локализованных в разных фоторецепторах. *Докл. Акад. наук*. 2013;449(2):240–245.
9. Belikov N., Yakovleva M., Feldman T., Demina O., Khodonov A., Lindström M., Donner K., Ostrovsky M. Lake and sea populations of *Mysis relicta* (Crustacea, Mysida) with different visual-pigment absorbance spectra use the same A1 chromophore. *PLoS One*. 2014;9(2):e88107.
10. Donner K., Zak P., Viljanen M., Lindström M., Feldman T., Ostrovsky M. Eye spectral sensitivity in fresh- and brackish-water populations of three glacial-relict *Mysis* species (Crustacea): Physiology and genetics of differential tuning. *J. Comp. Physiol. A*. 2016;202(2):297–312.
11. Feldman T., Yakovleva M., Viljanen M., Lindström M., Donner K., Ostrovsky M. Dark-adaptation in the eyes of a lake and a sea population of opossum shrimp (*Mysis relicta*): retinoid isomer dynamics, rhodopsin regeneration, and recovery of light sensitivity. *J. Comp. Physiol. A*. 2020;206(6):871–889.
12. Walls G.L. *The vertebrate eye and its adaptive radiation*. Cranbrook Institute of Science. Bulletin no. 19. Bloomfield Hills: Cranbrook Institute of Science; 1942. 785 pp.
13. Bowmaker J.K. Evolution of vertebrate visual pigments. *Vision Res*. 2008;48(20):2022–2041.
14. Lamb T.D. Evolution of the eye. Scientists now have a clear vision of how our notoriously complex eye came to be. *Sci. Amer*. 2011;305(1):64–69.
15. Островский М.А. Родопсин: эволюция и сравнительная физиология *Палеонтол. журн*. 2017;(5):103–113.
16. Островский М.А., Смитиенко О.А., Боченкова А.В., Фельдман Т.Б. Сходство и различие фотохимии родопсинов I и II типов. *Биохимия*. 2023;88(10):1847–1866.
17. Ostrovsky M.A., Sakina N.L., Dontsov A.E. Antioxidative role of eye screening pigments. *Vision Res*. 1987;27(6):893–899.
18. Dontsov A.E., Ostrovsky M.A. Ommochromes of the compound eye of arthropods from the insects and crustaceans classes: physicochemical properties and antioxidant activity. *Arthropods – New advances and perspectives*. Ed. V.D. Shields. London: IntechOpen; 2022. DOI: 10.5772/intechopen.107058.
19. Lindstrom M., Nilsson H. Eye function of *Mysis relicta* Loven (Crustacea) from two photic environments. Spectral sensitivity and light tolerance. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol*. 1988;120(1):23–37.
20. Audzijonyte A., Pahlberg J., Viljanen M., Donner K., Väinölä R. Opsin gene sequence variation across phylogenetic and population histories in *Mysis* (Crustacea: Mysida) does not match current light environments or visual-pigment absorbance spectra. *Mol Ecol*. 2012;21(9):2176–2196.
21. Hunt D.M., Carvalho L.S., Cowing J.A. Spectral tuning of shortwave-sensitive visual pigments in vertebrates. *Photochem. Photobiol*. 2007;83(2):303–310.
22. Dartnall H.A.J., Lythgoe J.N. The spectral clustering of visual pigments. *Vis. Res*. 1965;5(2):81–100.
23. Bridges C.D.B. The rhodopsin-porphyropsin visual system. *Handbook of sensory physiology VII/1: Photochemistry of vision*. Ed. H.J.A. Dartnall. Berlin: Springer; 1972:417–480.
24. Temple S.E., Plate E.M., Ramsden S. Seasonal cycle in vitamin A1/A2-based visual pigment composition during the life history of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *J. Comp. Physiol. A. Neuroethol. Sens. Neural. Behav. Physiol*. 2006;192(3):301–313.
25. Suzuki T., Arigawa K., Eguchi E. The effects of light and temperature on the rhodopsin-porphyropsin visual system of the crayfish *Procambarus clarkii*. *Zool. Sci*. 1985;2(6):455–461.
26. Di Prima D., Reinholdt P., Kongsted J. Color tuning in bovine rhodopsin through polarizable embedding. *J. Phys. Chem. B*. 2024;128(12):2864–2873.
27. Sakmar T.P., Menon S.T., Marin E.P., Awad E.S. Rhodopsin: insights from recent structural studies. *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct*. 2002;31:443–484.
28. Andersson O., Paulin L., Viljanen M., Donner K. New insights into the opsin genetics of *Mysis relicta*: the potential basis of individual and population-specific spectral tuning. *VISIONARIUM XXI 2023 at Tvärminne Zoological Station, University of Helsinki, Finland, September, 24–26. 2023*.

Поступила в редакцию 06.05.2024

После доработки 15.06.2024

Принята в печать 20.06.2024

REVIEW

Molecular mechanism of adaptation to a light environment: on the issue of visual pigments spectral tuning of two populations of shrimp *Mysis relicta* (Crustacea: Mysidacea)

M.A. Ostrovsky

¹Department of Molecular Physiology, School of Biology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1–12, Moscow, 119234, Russia;

²Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Kosygina st, 4, Moscow, 119334, Russia
e-mail: ostrovsky3535@mail.ru

The paper focuses on the light habitat of two populations of opossum shrimps *Mysis relicta* (Crustacea: Mysidacea) and the molecular mechanism of their visual pigments spectral tuning. Data are presented according to which spectral tuning is based on the expression of different opsins genes, and not on the replacement of chromophore groups: retinal 1 (A1) ↔ retinal 2 (A2).

Keywords: vision, rhodopsin, spectral tuning, crustaceans, comparative physiology

Funding: The research was supported by the Scientific Project of the State Order of the Government of Russian Federation to Lomonosov Moscow State University No. 122041400102-9.

Сведения об авторе

Островский Михаил Аркадьевич — докт. биол. наук, проф., академик РАН, зав. кафедрой молекулярной физиологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-27-76; e-mail: ostrovsky3535@mail.ru