



Капцов В.А.¹, Дейнего В.Н.¹, Шипилов И.В.²

Гигиенические проблемы взаимодействия искусственного освещения и межклеточной воды (обзор литературы)

¹ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт гигиены транспорта Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 125438, Москва, Россия;

²АО «Сибирская угольная энергетическая компания (СУЭК)», 115054, Москва, Россия

Введение. Рассмотрена роль воды и системы аквапоринов в условиях искусственного освещения и их значимость как для зрения, так и для организма человека в целом.

Материалы. В обзоре использованы базы данных Scopus, Web of Science, MedLine, The Cochrane Library, EMBASE, Global Health, CyberLeninka, RИИИ.

Основная часть. Показано, что функционально необходимый уровень водообмена в глазу человека в значительной степени зависит от эффективности работы аквапоринов, подвергающихся воздействию агрессивной внешней среды. К таким воздействиям относится избыточная доза синего света, электромагнитное излучение, избыточная концентрация в организме человека ртути, ионов меди и цинка. В этих условиях нарушается эффективность работы аквапоринов, что приводит к отечности в функциональных структурах глаза, изменению их оптических характеристик, и, как следствие, создаются условия для развития заболеваний зрительного анализатора. Оптическая система глаза очень чувствительна к геометрическим размерам роговицы, ириса, хрусталика и клеток Мюллера, а отеки этих клеток являются первопричинами оптических искажений изображения на сетчатке.

Показано положительное влияние гуморальных регуляторов активности аквапоринов (вазопрессин, эстрогены, компоненты ренин-ангиотензинной системы) на прозрачность хрусталика. Ключевую роль в предотвращении сферической аберрации в хрусталике глаза млекопитающих играет аквапорин-0.

Некоторые исследователи предполагают, что структурные нарушения динамики воды между клетками и внутри них лежат в основе многих заболеваний. Более поздние данные показали, что аквапорины могут также быть связаны с опухолью, пролиферацией и миграцией опухолевых клеток, а также с ангиогенезом в солидных и гематологических опухолях. Открытие аквапоринов, которые обеспечивают быстрый транспорт воды через биологические мембраны всех живых организмов (животных, растений и микроорганизмов), опровергло традиционную концепцию и явилось выдающимся достижением общей биологии, ботаники, физиологии, медицины и офтальмологии.

Заключение. Изменение свойств межклеточной воды в условиях искусственного освещения (и других негативно воздействующих факторов) является новой физиологической и гигиенической проблемой.

Ключевые слова: структура воды; аквапорины; светодиодное освещение; химическое загрязнение; обзор

Для цитирования: Капцов В.А., Дейнего В.Н., Шипилов И.В. Гигиенические проблемы взаимодействия искусственного освещения и межклеточной воды (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2022; 101(3): 244–248. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-244-248>

Для корреспонденции: Капцов Валерий Александрович, доктор мед. наук, профессор, чл.-корр. РАН, руководитель отд. гигиены труда ФГУП «Всероссийский НИИ гигиены транспорта» Роспотребнадзора, 125438, Москва. E-mail: karpovva39@mail.ru

Участие авторов: Капцов В.А. — концепция и дизайн исследования, написание текста, оформление и редактирование статьи, ответственность за целостность всех частей статьи; Дейнего В.Н. — сбор материала, обработка данных, написание текста; Шипилов И.В. — сбор материала и обработка данных.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 12.11.2021 / Принята к печати: 25.11.2021 / Опубликована: 08.04.2022

Valery A. Kaptsov¹, Vitaly N. Deynego¹, Igor V. Shipilov²

Hygienic problems of interaction of artificial lighting and intercellular water (literature review)

¹All-Russian Research Institute of Transport Hygiene of the Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing, Moscow, 125438, Russian Federation;

²Joint stock company "Siberian Coal Energy Company" (АО «СУЭК»), Moscow, 115054, Russian Federation

The role of water and aquaporin system in artificial lighting conditions and their importance for vision and the human body as a whole is considered.

The review used the databases Scopus, Web of Science, MedLine, The Cochrane Library, EMBASE, Global Health, CyberLeninka, and RSCI.

The functionally necessary level of water exchange in the human eye was shown to largely depend on the efficiency of aquaporins exposed to aggressive environment. Such effects include an excessive dose of blue light, electromagnetic radiation, and excessive concentration of mercury, copper ions, and zinc ions in the human body. In the conditions of chemical pollution, excessive blue light, the violated efficiency of aquaporins leads to swelling in the functional structures of the eye, changes in their optical characteristics. So far the conditions for the development of diseases of the visual analyzer are created. The optical system of the eye is very sensitive to the geometric dimensions of the cornea, iris, lens and Muller cells. Edema of these cells is the primary causes of optical distortions of images on the retina.

The positive effect of humoral regulators of aquaporin activity (vasopressin, estrogens, component of the renin-angiotensin system) on the lens transparency was shown. Aquaporin-0 plays a key role in the development of the refractive index gradient in the mammalian eye lens to prevent spherical aberration.

Aquaporin system permeates all cells of the functional structures of the body. A number of researchers suggest structural disorders of water dynamics between and within cells to be the basis of many diseases. More recent data have shown that aquaporin may also be associated with tumor, proliferation and migration of tumor cells, as well as angiogenesis in solid and hematological tumors.

The discovery of aquaporins, which provide rapid transport of water through the biological membranes of all living organisms (animals, plants and microorganisms) has disproved the traditional concept and was an outstanding achievement of General biology, botany, physiology, medicine and ophthalmology. Changing the properties of intercellular water in artificial lighting (and other negative factors) is a new physiological and hygienic problem.

Keywords: water structure; aquaporin; led lighting; chemical pollution

For citation: Kaptsov V.A., Deynego V.N., Shipilov I.V. Hygienic problems of interaction of artificial lighting and intercellular water (literature review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(3): 244–248. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-244-248> (In Russian)

For correspondence: Valery A. Kaptsov, MD, PhD, DSci., Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Occupational Hygiene of the All-Russian Research Institute of Transport Hygiene of Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing, Moscow, 125438, Russian Federation. E-mail: kapcovva39@mail.ru

Information about authors: Kaptsov V.A., <https://orcid.org/0000-0002-3130-2592>

Contributions: Kaptsov V.A. – the concept and design of the study, writing the text, design and editing of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article. Deynego V.N. – material collection, data processing, text writing. Shipilov I.V. – material collection and data processing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: November 12, 2021 / Accepted: November 25, 2021 / Published: April 08, 2022

Академик С.И. Вавилов в своей классической работе «Глаз и Солнце» прозорливо отмечал: «Надо ждать, пока мы привыкнем к новым словам и новым фактам и начнём понимать то, что сейчас уже известно, но непонятно». Это в полной мере относится к воде и её влиянию на клеточные и межклеточные процессы. Гигиенистов всегда интересовало воздействие света и воды на здоровье человека. В своих исследованиях они в основном уделяли внимание качеству питьевой воды [1, 2] и её роли в клетках, но не рассматривали проблему циркуляции в организме человека при нахождении в искусственной световой среде.

В настоящее время человек всё чаще находится в условиях световой среды, которая формируется искусственными источниками света и устройствами отображения информации. Такие источники создают световую среду с избыточной дозой синего света и дефицитом красной составляющей спектра. Учитывая это обстоятельство, важно понять, как искусственный свет влияет на циркуляцию потоков воды и их перемещение в организме человека через систему аквапоринов (АКП). Новые гигиенические риски для здоровья – воздействие электромагнитного облучения (света) на структуру воды – влияют на эффективность работы системы аквапоринов, которые пронизывают клетки всех органов человека [3] и, в частности, зрительного анализатора [4].

На рис. 1 (см. на вклейке) приведена общая схема размещения аквапоринов в структурах глаза человека [5].

Содержание воды в организме человека составляет в среднем 60% от массы тела. Большая часть воды (примерно 2/3) находится внутри клеток (интрацеллюлярная жидкость), а меньшая часть (экстрацеллюлярная жидкость) – вне клеток, а именно внутри кровеносных и лимфатических сосудов, а также в межклеточном пространстве [6].

Вода – это универсальная дисперсионная среда живой материи. Активные клетки состоят на 60–95% из воды, находящейся в двух формах: свободной и связанной. Свободная вода составляет 95% всей воды в клетке и используется главным образом как растворитель и дисперсионная среда коллоидной системы протоплазмы. Связанная вода (4–5% всей воды клетки) прочно соединена с белками водородными и другими связями.

Молекула воды представляет собой полярный диполь: кислородный атом несёт частичный отрицательный заряд, а два водородных – частично положительные заряды. Поэтому при взаимодействии молекул воды между ними устанавливаются водородные связи, которые влияют на её физические свойства. Из-за высокой полярности молекул вода не имеет себе равных по растворению других полярных соединений, в воде растворяется больше веществ, чем в любой другой жидкости. Именно поэтому в водной среде клетки осуществляется множество химических реакций. Вода растворяет продукты обмена веществ и выводит их из клетки и организма в целом. Согласно современной кластерно-фракт-

альной модели воды, она может находиться и в свободном молекулярном, и в кластерном состоянии [7]. Это очень важно для понимания межклеточного водообмена в рамках аквапориновой системы.

Долгое время, до 2003 г., считалось, что вода легко преодолевает биологические мембраны путём простой диффузии, хотя факты и точные расчёты противоречили такой концепции. В 2003 г. молекулярный биолог Питер Эгр (Peter Agre) и биохимик Родерик Мак-Киннон (Roderick MacKinnon) получили Нобелевскую премию по химии за открытие системы особых протеинов – аквапоринов (АКП) – белков, регулирующих межклеточный транспорт воды в тканях [8, 9].

Аквапорины, или «водные каналы», избирательно пропускают молекулы воды, позволяя ей поступать в клетку и покидать её, в то же время препятствуя потоку ионов и других растворимых веществ. Акваглицеропорины в свою очередь пропускают не только воду, но и глицерин, CO₂, аммиак и мочевины, в зависимости от диаметра и формы образуемой поры, однако аквапорины совершенно непроницаемы для заряженных частиц, и это их свойство позволяет сохранять электрохимический мембранный потенциал.

Открытие трансмембранных водных каналов (аквапоринов), которые обеспечивают быстрый транспорт воды через биологические мембраны всех живых организмов (животных, растений и микроорганизмов), опровергло традиционную концепцию и явилось выдающимся достижением общей биологии, ботаники, физиологии, медицины и офтальмологии [9–11].

Наибольшее значение функция аквапоринов имеет для органов, транспортирующих большое количество жидкости, – почек и секреторных желёз. Весьма важна она и для тканей глаза – роговой оболочки, хрусталика, сетчатки, а также для кожи человека. Именно в этих тканях взаимодействуют спектр света, вода и система аквапоринов. В работе [12] выявлено значительное уменьшение АКПЗ в эпидермисе на лице у женщин, подвергавшихся регулярной инсоляции, по сравнению с участками кожи, защищёнными от солнца. Примечательно, что связанное с ультрафиолетовым облучением снижение уровня АКПЗ отмечалось только у женщин в возрасте старше 40 лет. Это означает, что дефицит аквапоринов при хроническом фотоповреждении зависит от возраста. Многочисленные данные показывают, что синтез водных каналов АКПЗ нарушается с возрастом и при постоянной инсоляции. Снижение уровня АКПЗ может не только запустить процесс фотоповреждения, но и усугубить признаки хронобиологического старения кожи, для профилактики которого разрабатывается косметика со специальными ингредиентами.

Подробно информация о типах аквапоринов, находящихся в тканях зрительного анализатора, изложена в работах [10, 13].

Локализация аквапоринов в тканях глаза, слёзной железы и зрительного нерва [10]**Localization of aquaporins in the tissues of the eye, lacrimal gland, and optic nerve [10]**

Аквапорин Aquaporin (AQP)		Ткани и клетки АКП Tissues and cells
АКП0	AQP0	Клетки волокон хрусталика, биполярные клетки сетчатки Lens fiber cells, retinal bipolar cells
АКП1	AQP1	Эндотелий роговицы, эпителий радужки, ресничный эпителий, эпителий хрусталика, пигментный эпителий сетчатки, фоторецепторные клетки, трабекулярная сетка, клетки Мюллера Corneal endothelium, iris epithelium, ciliary epithelium, lens epithelium, pigment epithelium of retina, photoreceptor cells, trabecular meshwork, Muller cells
АКП3	AQP3	Конъюнктив и эпителий роговицы, пигментный эпителий сетчатки Conjunctiva and corneal epithelium, pigment epithelium of retina
АКП4	AQP4	Зрительный нерв, сетчатка, ресничный эпителий, клетки слёзных ацинусов Optic nerve, retina, ciliary epithelium, lacrimal acini cells
АКП5	AQP5	Клетки ацинусов и протоков слёзных желёз, эпителий роговицы, эпителий и волокна хрусталика, пигментный эпителий сетчатки Cells of the acini and ducts of the lacrimal glands, corneal epithelium, epithelium and lens fibers, pigment epithelium of retina
АКП6	AQP6	Сетчатка / Retina
АКП7	AQP7	Эпителий и эндотелий роговицы, лимбальная ткань роговицы, хрусталик и ресничный эпителий, пигментный эпителий сетчатки, эндотелий капилляров во всех частях глаза Corneal epithelium and endothelium, corneal limbal tissue, lens and ciliary epithelium, pigment epithelium of retina, capillary endothelium in all parts of the eye
АКП8	AQP8	Сетчатка / Retina
АКП9	AQP9	Зрительный нерв, сетчатка, лимбальная ткань роговицы Optic nerve, retina, corneal limbal tissue
АКП11	AQP11	Пигментный эпителий сетчатки и нейроретины, лимбальная ткань роговицы Pigment epithelium of retina and neuroretina, corneal limbal tissue
АКП12	AQP12	Нейроретина Neuroretina

Как видно из таблицы, в эпителии роговицы представлены четыре разных АКП: 1, 3, 5 и 7. Это обусловлено спецификой эпителия роговицы (и конъюнктивы), который представляет собой наружную поверхность глаза, контактирующую с внешней средой и омываемую слёзной жидкостью. Поэтому названные АКП принимают участие как в обеспечении нормального объёма (толщины) роговицы, так и в сохранении объёма слёзной жидкости, омывающей её поверхность, и постоянства осмолярности. Это постоянство зависит не только от слёзной жидкости, но и от осмотического тока через эпителий роговицы и потери воды вследствие её испарения [14].

АКП представляют собой цельные мембранные белки, основная функция которых заключается в транспортировке воды через клеточные мембраны в ответ на осмотические градиенты. На поверхности глаза АКП1 экспрессируется в эндотелии роговицы, АКП3 и АКП5 – в эпителии роговицы, АКП3 – в эпителии конъюнктивы. АКП также экспрессируются в клетках хрусталика (АКП0), эпителии хрусталика (АКП1), ресничном эпителии (АКП1, АКП4) и клетках Мюллера сетчатки (АКП4). Мутации в АКП0 вызывают у человека врождённые катаракты. Анализ фенотипа мышей с отсутствием индивидуальных АКП даёт основание предположить участие этих белков в поддержании прозрачности роговицы и хрусталика, восстановлении эпителия роговицы, регуляции внутриглазного давления, трансдукции сигнала сетчатки и отёка сетчатки после повреждения. Полученные данные о фенотипе мышей указывают на то, что АКП являются потенциальными мишенями для лечения повышенного внутриглазного давления и глазных расстройств с участием роговицы, хрусталика и сетчатки. Тем не менее необходимы дальнейшие исследования для определения механизмов кле-

точного уровня для функций глазного АКП, установления актуальности для глазных заболеваний человека выводов, полученных на мышах, и для разработки лекарств, модулирующих АКП.

В работе [15] рассмотрены вопросы молекулярной физиологии и патологии хрусталика глаза и особое внимание уделено специфическим белкам хрусталика – кристаллинам.

В настоящее время достаточно хорошо изучены патогенетические закономерности развития катаракты [16]. Помутнение хрусталика – сложный многофакторный и многостадийный процесс. На прозрачность хрусталика влияют углеводный дисбаланс, неблагоприятные факторы окружающей среды – световая энергия, радиоактивное излучение, электромагнитное поле, механические повреждения. Авторы работы [15] отмечают, что для хрусталика «стрессами» являются слишком высокий уровень освещённости, коротковолновое, в первую очередь ультрафиолетовое излучение, отсутствие кровоснабжения и отсутствие нервной и гормональной регуляции. Важнейшими звеньями этой системы являются присутствие в хрусталике альфа-кристаллина, а также чрезвычайно низкое парциальное давление кислорода, препятствующее развитию деструктивных окислительных процессов.

В работах [15, 16] отмечено, что ключевой этап помутнения хрусталика заключается в агрегации водорастворимых белков – кристаллинов, физико-химическое состояние которых определяет прозрачность в большей степени, чем изменения других компонентов. В нормально функционирующем хрусталике кристаллины находятся в виде высококонцентрированного раствора, прозрачного для видимого света. При развитии катаракты под действием неблагоприятных факторов происходит образование крупномолекулярных

белковых агрегатов, которые в определённых концентрациях служат причинами помутнения хрусталика. В последние годы в исследовательских работах, посвящённых проблеме катаракты, большое внимание стали уделять состоянию его водного гомеостаза, непосредственно воздействующего на структуру водорастворимых кристаллинов, что влияет на прозрачность хрусталика.

В работе [16] отмечалось, что практически не исследован вопрос об источнике биологически активных веществ, регулирующих функцию аквапоринов хрусталика. Возможно, на эту роль претендует цилиарное тело, поскольку в некоторых работах [17] высказано предположение о том, что оно является мультиэндокринной железой, продуцирующей комплекс биологически активных веществ. Кроме того, цилиарное тело участвует в продуцировании водянистой влаги камер глаза.

В работе [18] установлено положительное влияние гуморальных регуляторов активности аквапоринов (вазопрессин, эстрогены, компоненты ренин-ангиотензинной системы) на прозрачность хрусталика.

Как видно из таблицы, в хрусталике присутствуют АКП 0, 1 и 5. При этом АКП0 локализуется в волокнах и по заднему полюсу, АКП1 – в клетках эпителия переднего полюса, а АКП5 – в эпителии и волокнах хрусталика. Главным АКП, который содержится в больших количествах в мембранах клеток волокон хрусталика, несомненно, является АКП0. Он был выделен из хрусталика задолго до открытия аквапоринов, в 1976 г., и получил вначале название «МІР» (*major intrinsic protein* – главный внутренний белок). Установлено, что АКП0 выполняет в хрусталике по крайней мере две функции – водного канала и структурную. Он является основным белком щелевых межклеточных контактов и вторую функцию выполняет как молекула адгезии, обеспечивающая сужение межклеточного пространства волокон хрусталика, что необходимо для сохранения его прозрачности и аккомодационных свойств. АКП0 играет ключевую роль в развитии градиента индекса преломления в хрусталике глаза млекопитающих для предотвращения сферической аберрации [18–21].

В работе «Аквапорины в глазу: определения, функции и роль при заболеваниях глаз» [22] приведена общая схема распределения аквапоринов в клетках сетчатки глаза (рис. 2, см. на вклейке).

Из приведённых данных видно, что система аквапоринов в глазу человека является разнотипной, сложной и увеличивается с присутствием аквапоринов в разных клетках глии. Различают следующие виды глии: астроглия, олигодендроглия, микроглия [22].

По современным представлениям о структуре и функциях глиальных клеток, наиболее полно исследованы мюллеровские клетки, являющиеся неотъемлемым компонентом сетчатки глаза. Деятельность их не сводится лишь к опорной и трофической роли. Мюллеровские клетки, несомненно, участвуют в поддержании гомеостаза сетчатки, регулируют ионный состав окружающей нейроны среды, направляют рост нервных отростков, участвуют в репаративных процессах. Таким образом, их роль в сетчатке полифункциональна.

Клетки Мюллера являются оптоволоконном в оптической системе глаза [23]. Воздействие избыточной дозы синего света вызывает нарушение работы аквапорина АКП4, вызывает отёк клеток Мюллера [24], при этом меняются оптические свойства волокна и, как следствие, нарушается зрительное восприятие.

В работе [25] показано, что снижение АКП4 в клетках Мюллера при экспериментальной глаукоме влияет на поток воды, особенно в сетчатке, а синий свет вызывает подавление АКП 1, 3 и 9 в кератоцитах человека [26].

АКП, вероятно, окажутся значимыми в патофизиологии различных клинических состояний (от несахарного диабета до различных форм отёков), и в конечном итоге они могут стать объектом лечения заболеваний изменённого водного гомеостаза [27].

В структуре АКП присутствуют атомы серы, которые служат мишенью для ртутных ингибиторов. Ртуть подавляет осмотическую водную проходимость, что снижает эффективность водообмена. В работе [9] показано, что помимо ртути проницаемость АКП могут блокировать ионы Cu, ионы Zn, тетраэтиламмония хлорид. Данные о способности ртути, меди и цинка угнетать транспорт воды позволили объяснить клиническую картину отравления этими солями. Ряд исследователей полагают, что АКП причастны к развитию опухолевого процесса, инфаркта миокарда, отёка мозга, в том числе при эклампсии, а также ожирения и других метаболических нарушений.

Таким образом, изучение вопроса о роли АКП в патогенезе различных заболеваний является весьма перспективным.

В статье [28] постулируется, что структура воды изменяется как под влиянием биомолекул, так и факторов, способствующих заболеванию, таких как определённые сольватированные ионы, и в свою очередь динамика и структура воды влияют на функцию биомолекулярных взаимодействий. Хотя структурные и динамические изменения неувловимы, они нарушают хорошо сбалансированную систему, достаточную для облегчения возможности заболевания. Авторы предположили, что в основе многих заболеваний лежит нарушение динамики воды между клетками и внутри них. Они рассматривали последние достижения в области магнитобиологии, нанобиологии, а также науки о коллоидах и интерфейсах, которые убедительно указывали на решающую роль уникальных физических свойств намагниченной воды в обеспечении жизни на клеточном уровне. Межфазное водное и клеточное поверхностное натяжение, обычно поддерживаемое биологическими сульфатами на поверхностях мембран, нарушается внешними водными стрессорами, такими как алюминий, с последствиями, которые включают в себя большую локальную гидрофобность воды, повышенное водное натяжение и межфазное растяжение. Конечным результатом является большая «жесткость» во внеклеточном матриксе и «мягкое» раковое или «мягкое» нейродегенеративное состояние внутри клеток. Данная гипотеза даёт основание для понимания того, почему многие современные идиопатические заболевания имеют высокий уровень стереотипности.

В работе [28] отмечается, что АКП ответственны за транспортровку не только воды, но и растворённых веществ, таких как глицерин, газы и ионы. Более поздние данные показали, что АКП могут также играть роль в отёке, связанном с опухолью, пролиферацией и миграцией опухолевых клеток, а также в ангиогенезе солидных и гематологических опухолей. Ингибиторы АКП в опухолевых клетках и микрососудах предложены в качестве новых терапевтических стратегий. Авторы обращали особое внимание на возможность рассматривать АКП как важные диагностические и терапевтические биомаркеры, которые станут основой новой противораковой терапии путём ингибирования АКП.

Заключение

1. Воздействие избыточного синего света на систему АКП вызывает отёк функциональных клеток зрительного анализатора, искажение его оптической системы, создаёт предпосылки для развития деструктивных процессов и развития заболеваний.
2. Структурные изменения состояния воды в клетках глаза снижают эффективность водообмена через АКП, на производительность которых влияет загрязнение ртутью, медью и цинком.
3. В печени «отёк – опухоль – рак» структурное состояние воды и эффективная работа АКП являются одним из ключевых факторов развития болезни.
4. Исключение факторов, изменяющих структуру воды и снижающих эффективность работы АКП клеток, является новой медицинской и гигиенической задачей.

Литература

(п.п. 3, 4, 7, 10, 12, 13, 16, 18–20, 23–28 см. References)

1. Недачин А.Е., Артемова Т.З., Дмитриева Р.А., Доскина Т.В., Талаева Ю.Г., Иванова Л.В. и др. Проблемы эпидемической безопасности питьевого водопользования населения России. *Гигиена и санитария*. 2005; 84(6): 14–8.
2. Рахманин Ю.А., Михайлова Р.И. Анализ пищевых рисков и безопасность водного фактора. *Анализ риска здоровью*. 2018; (4): 31–42. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.4.04>
5. Сукманский О.И. Порухения водно-минерального обміну. В кн.: Зайко М.Н., Быць Ю.В., ред. *Патофізіологія: підручник*. Киев: Медицина; 2010: 373–87.
6. Рахманин Ю.А., Стехин А.А., Яковлева Г.В. *Биофизика воды: Квантовая нелокальность в технологиях водоподготовки; регуляторная роль ассоциированной воды в клеточном метаболизме; нормирование биоэнергетической активности питьевой воды*. М.: ЛЕНАНД; 2016.
8. Крысова А.В., Циркин В.И., Куншин А.А. Роль аквапоринов в транспорте воды через биологические мембраны. *Вятский медицинский вестник*. 2012; (2): 50–8.
9. Сукманский О.И., Пасечникова Н.В., Вит В.В., Науменко В.А., Сукманский И.О. Аквапорины (водные каналы): офтальмологические аспекты. *Офтальмологический журнал*. 2013; (1): 66–73.
11. Аквапорины – естественные проводники влаги и защитники кожи. Доступно: https://cosmetic.ua/akvaporini_estestvennie_provodniki_vlazi_i_zaschitniki_kozhi
14. Муранов К.О., Островский М.А. *Молекулярная физиология и патология хрусталика глаза*. М.: ТОРУС ПРЕСС; 2013.
15. Брагин Е.В. Обзор факторов риска развития старческой катаракты. *Анализ риска здоровью*. 2018; (1): 113–25.
17. Сумеркина В.А. *Роль аквапоринов в поддержании прозрачности хрусталика (экспериментальное исследование)*: Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. Челябинск; 2010.
21. Школьник-Яррос Е.Г., Калинина А.В. *Нейроны сетчатки*. М.: Наука; 1986.
22. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Восприятие цвета при светодиодном освещении – риски здоровью. *Анализ риска здоровью*. 2017; (2): 16–25. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2017.2.02>

References

1. Nedachin A.E., Artemova T.Z., Dmitrieva R.A., Doskina T.V., Talaeva Yu.G., Ivanova L.V., et al. Problems of epidemic safety of drinking water use by the population of Russia. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2005; 84(6): 14–8. (in Russian)
2. Rakhmanin Yu.A., Mikhaylova R.I. Food risks analysis and water safety. *Analiz riska zdorov'yu*. 2018; (4): 31–42. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.4.04> (in Russian)
3. Day R.E., Kitchen P., Owen D.S., Bland C., Marshall L., Conner A.C., et al. Human aquaporins: regulators of transcellular water flow. *Biochim. Biophys. Acta*. 2014; 1840(5): 1492–506. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2013.09.033>
4. Schey K.L., Wang Z., Wenke L.J., Qi Y. Aquaporins in the eye: expression, function, and roles in ocular disease. *Biochim. Biophys. Acta*. 2014; 1840(5): 1513–23. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2013.10.037>
5. Sukmans'kiy O.I. *Violation of water-mineral metabolism*. In: Zayko N.N., Byts' Yu.V., eds. *Pathophysiology: Textbook*. Kiev: Meditsina; 2010: 373–87.
6. Rakhmanin Yu.A., Stekhin A.A., Yakovleva G.V. *Biophysics of Water: Quantum Nonlocality in Water Treatment Technologies; Associated Regulatory Role of Water in Cellular Metabolism; Regulation of Bioenergetic Activity of Drinking Water [Biofizika vody: Kvantovaya nelokalnost' v tekhnologiyakh vodopodgotovki; regulatorynaya rol' assotsirovannoy vody v kletochnom metabolizme; normirovaniye bioenergeticheskoy aktivnosti pit'evoy vody]*. Moscow: LENAND; 2016. (in Russian)
7. Beitz E. Preface: aquaporins. *Handb. Exp. Pharmacol.* 2009; (190): 5–6.
8. Krysova A.V., Tsirkin V.I., Kunshin A.A. The role of aquaporins in water transport through biological membranes. *Vyatskiy meditsinskiy vestnik*. 2012; (2): 50–8. (in Russian)
9. Sukmanskiy O.I., Pasechnikova N.V., Vit V.V., Naumenko V.A., Sukmanskiy I.O. Aquaporins (water channels): ophthalmological aspects. *Oftal'mologicheskii zhurnal*. 2013; (1): 66–73. (in Russian)
10. Verkman A.S. Aquaporins at a glance. *J. Cell. Sci.* 2011; 124(Pt. 13): 2107–12. <https://doi.org/10.1242/jcs.079467>
11. Aquaporins are natural moisture conductors and skin protectors. Available at: http://cosmetic.ua/akvaporini_estestvennie_provodniki_vlazi_i_zaschitniki_kozhi (in Russian)
12. Hamann S., Zeuthen T., La Cour M., Nagelhus E.A., Ottersen O.P., Agre P., et al. Aquaporins in complex tissues: distribution of aquaporins 1–5 in human and rat eye. *Am. J. Physiol.* 1998; 274(5): C1332–45. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1998.274.5.c1332>
13. Verkman A.S., Ruiz-Ederra J., Levin M.H. Functions of aquaporins in the eye. *Prog. Retin. Eye Res.* 2008; 27(4): 420–33. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2008.04.001>
14. Muranov K.O., Ostrovskiy M.A. *Molecular Physiology and Pathology of the Lens of the Eye [Molekulyarnaya fiziologiya i patologiya khrustalika glaza]*. Moscow: TORUS PRESS; 2013. (in Russian)
15. Bragin E.V. Risk factors which cause senile cataract evolvement: outline. *Analiz riska zdorov'yu*. 2018; (1): 113–25. (in Russian)
16. Coca-Prados M., Escribano J. New perspectives in aqueous humor secretion and in glaucoma: the ciliary body as a multifunctional neuroendocrine gland. *Prog. Retin. Eye Res.* 2007; 26(3): 239–62. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2007.01.002>
17. Sumerkina V.A. *The role of aquaporins in maintaining the transparency of the lens (experimental study)*: Diss. Chelyabinsk; 2010. (in Russian)
18. Chepelinsky A.B. Structural function of MIP/aquaporin 0 in the eye lens; genetic defects lead to congenital inherited cataracts. *Handb. Exp. Pharmacol.* 2009; (190): 265–97. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79885-9_14
19. Kumari S.S., Varadaraj K. Aquaporin 0 plays a pivotal role in refractive index gradient development in mammalian eye lens to prevent spherical aberration. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2014; 452(4): 986–91. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2014.09.032>
20. Gonen T., Sliz P., Kistler J., Cheng Y., Walz T. Aquaporin-0 membrane junctions reveal the structure of a closed water pore. *Nature*. 2004; 429(6988): 193–7. <https://doi.org/10.1038/nature02503>
21. Shkol'nik-Yarros E.G., Kalinina A.V. *Retinal Neurons [Neyrony setchatki]*. Moscow: Nauka; 1986. (in Russian)
22. Kaptsov V.A., Deynego V.N. Perception of color in LED lighting – health risks. *Analiz riska zdorov'yu*. 2017; (2): 16–25. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2017.2.02> (in Russian)
23. Iandiev I., Wurm A., Hollborn M., Wiedemann P., Grimm C., Remé C.E., et al. Müller cell response to blue light injury of the rat retina. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2008; 49(8): 3559–67. <https://doi.org/10.1167/iovs.08-1723>
24. Wang Y. Aquaporin 4 and kir4.1 distribution in retinal glial cells of normal macaque eyes and eyes with experimental glaucoma 2015-12. Available at: <https://uh-ir.tdl.org/handle/10657/2177>
25. Avola R., Graziano A.C.E., Pannuzzo G., Cardile V. blue light induces down-regulation of Aquaporin 1, 3, and 9 in human keratinocytes. *Cells*. 2018; 7(11): 197. <https://doi.org/10.3390/cells7110197>
26. King L.S., Yasui M., Agre P. Aquaporins in health and disease. *Int. J. Mol. Sci.* 2016; 17(8): 1213.
27. Davidson R.M., Lauritzen A., Senef S. Biological water dynamics and entropy: A biophysical origin of cancer and other diseases entropy. 2013; 15(9): 3822–76.
28. Wang J., Feng L., Zhu Z., Zheng M., Wang D., Chen Z., et al. Aquaporin as diagnostic and therapeutic targets in cancer: How far we are? *J. Transl. Med.* 2015; 13: 96. <https://doi.org/10.1186/s12967-015-0439-7>

К статье В.А. Капцова и соавт.
To the article by V.A. Kaprtsov et al.

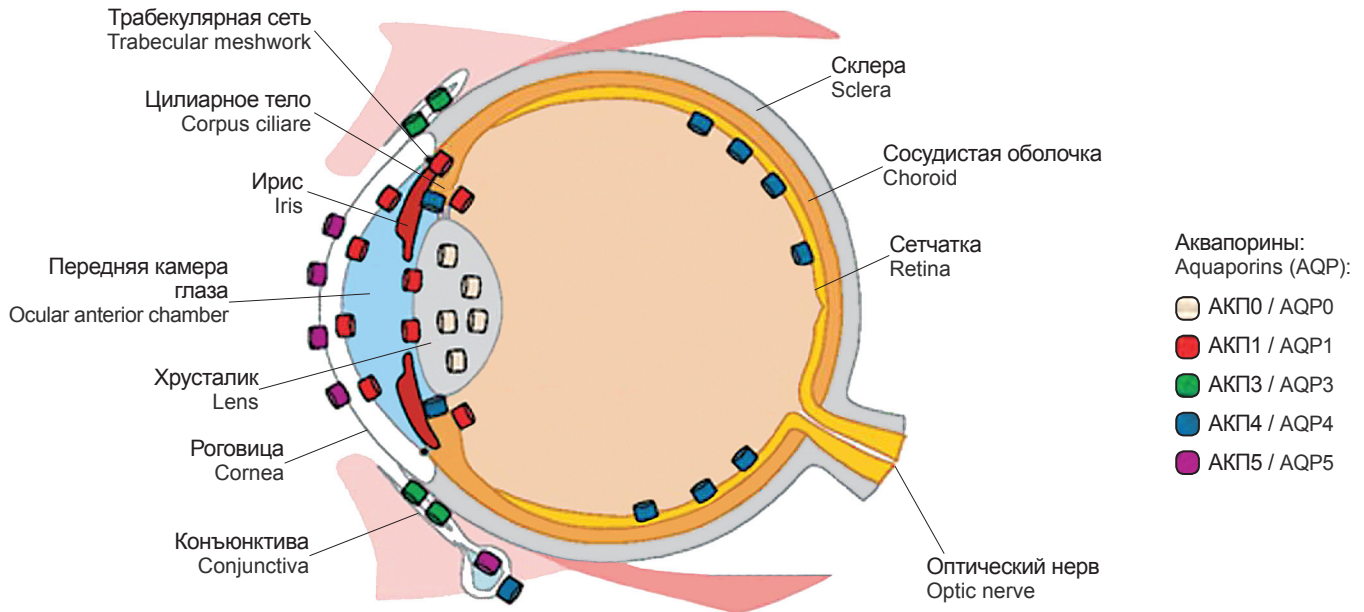


Рис. 1. Распределение аквапоринов в глазу человека.
Fig. 1. Distribution of aquaporins in the human eye.

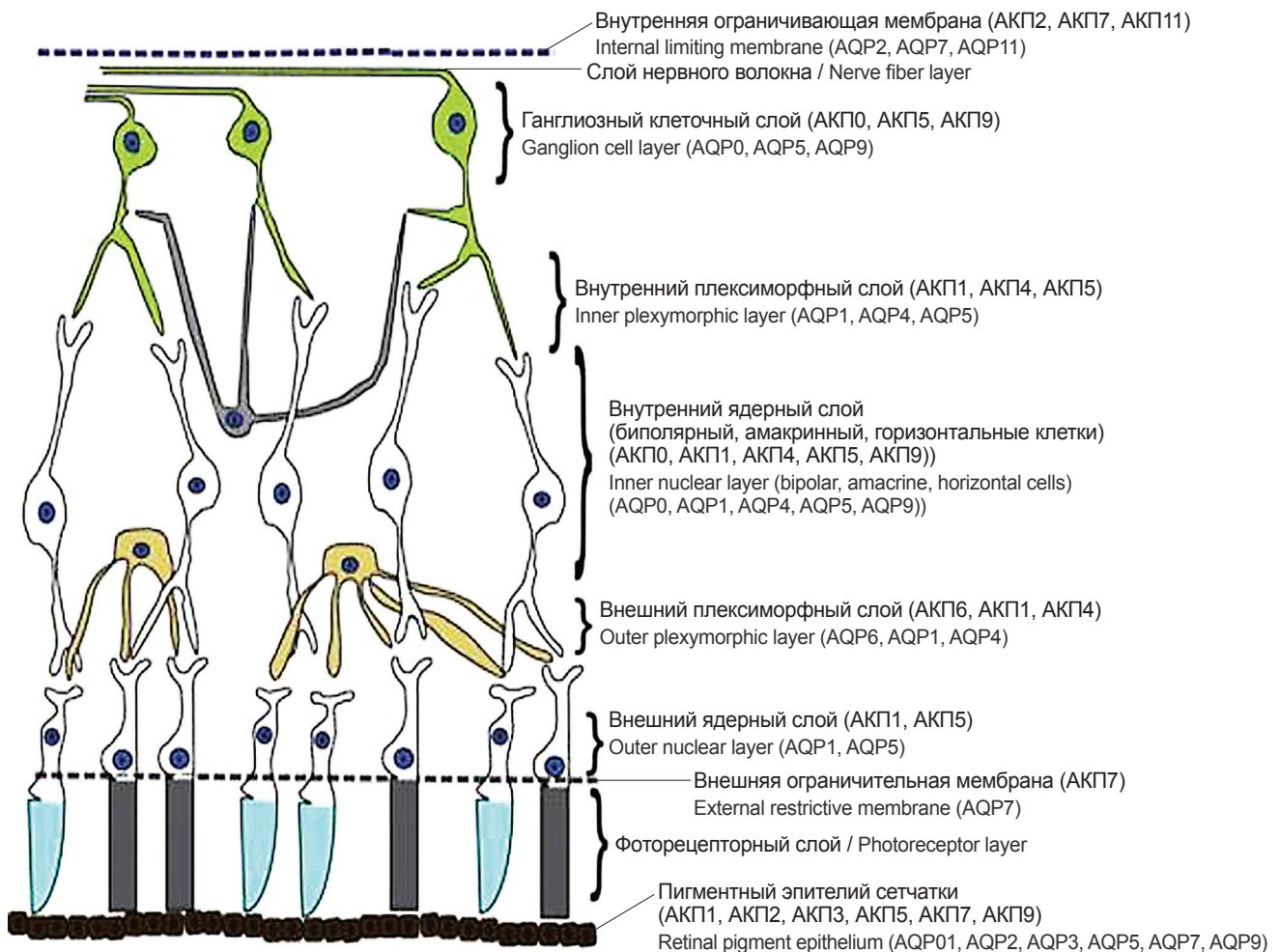


Рис. 2. Схема слоёв клеток сетчатки и наиболее распространённые аквапорины, выраженные в каждом слое [22].
Fig. 2. Diagram of retinal cell layers and the most common aquaporins expressed in each layer [22].