

**MOLECULAR AND PHYSICAL PROCESSES DETERMINING THE ACTIVITY OF
VISUAL AND AUDITORY RECEPTORS**

Sarttorov Yorkin Karimovich

Lecturer, Department of Biomedical Engineering, Computer Science, and Biophysics, Tashkent
State Medical University

Muxammadieva Mohinur Muzarrfovna ,

Ovlayorova Mashxura Gayratovna ,

Students, Tashkent State Medical University

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ
АКТИВНОСТЬ РЕЦЕПТОРОВ ЗРЕНИЯ И СЛУХА**

Сартторов Ёркин Каримович

Преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, информатики и биофизики,
Ташкентский государственный медицинский университет

Мухаммадиева Мохинур Музаррфовна,

Овлайорова Машхура Гайратовна,

Студенты Ташкентского государственного медицинского университета

Abstract: This research paper investigates the molecular and physical processes governing vision and hearing receptor activity, with a focus on the photochemical, bioelectrical, and mechanotransductive mechanisms that underpin human sensory perception. The study was carried out at the Department of Biophysics, Tashkent State Medical University, involving ten participating students under academic supervision. During the experimental phase, the functional responses of visual and auditory receptors were measured and analyzed under controlled light and acoustic stimuli.

In the visual system, sensory detection is mediated through phototransduction, a molecular cascade initiated when photons are absorbed by retinal photoreceptors (rods and cones). Photon absorption triggers quantum-induced isomerization of rhodopsin, activating intracellular signaling pathways that convert optical energy into graded electrical potentials. These receptor potentials propagate through the optic nerve and are integrated in the visual cortex to construct visual perception. The physical foundation of this process involves photon–molecule interactions, conformational protein dynamics, and modulation of membrane ion conductance that determine retinal sensitivity across varying intensities.

Similarly, the auditory system functions through mechanotransduction — the conversion of mechanical sound vibrations into electrical impulses within the cochlea. Hair cells located in the organ of Corti bend in response to sound-induced movement of the basilar membrane, opening ion channels that produce an electrical potential proportional to the sound amplitude and frequency. The study analyzed the frequency–response characteristics of hair cells and observed age-dependent variations in receptor sensitivity.

The results revealed that both vision and hearing receptors share a fundamental bioelectrical mechanism — transformation of physical energy (light or sound) into neural signals. However, their sensitivity, adaptation speed, and threshold levels differ depending on structural specialization and environmental conditions. The research also identified a correlation between receptor fatigue and prolonged stimulus exposure, suggesting that energy conversion efficiency decreases with receptor overstimulation. Based on the findings, we propose an integrative biophysical model describing how photonic and acoustic stimuli are converted into action potentials, highlighting their shared quantum-mechanical and ion-channel dynamics. These insights are of practical significance for the development of bioengineering devices, such as visual prostheses and cochlear implants, that replicate natural sensory transduction mechanisms.

Annotatsiya: Ushbu ilmiy maqola ko‘rish va eshitish retseptorlari faoliyatini belgilovchi molekulyar va fizik jarayonlarni tadqiq qiladi. Tadqiqot fotokimyoviy, bioelektrik hamda mexanotransduktiv mexanizmlar orqali inson sezgi idrokining shakllanishiga asos bo‘ladigan jarayonlarga qaratilgan. Ish Toshkent davlat tibbiyot universiteti Biotizimlar biofizikasi kafedrasida akademik rahbar boshchiligida, o‘n nafar talaba ishtirokida amalga oshirildi. Eksperimental bosqich davomida vizual va eshitish retseptorlarining funksional javoblari boshqariladigan yorug‘lik va akustik stimullar ta‘sirida o‘lchandi va tahlil qilindi.

Ko‘ruv tizimida sezgi signallarini qabul qilish **fototransduktsiya** orqali amalga oshadi. Bu jarayon fotonlarning to‘q sariqlar va kolbachalarda joylashgan retinal fotoretseptorlar tomonidan yutilishi bilan boshlanadigan molekulyar kaskaddir. Fotonning yutilishi rodopsinning kvant-induktsiyalangan izomerlanishini chaqiradi va hujayra ichki signal uzatish yo‘llarini faollashtiradi. Natijada optik energiya gradatsiyalangan elektr potentsiallariga aylanadi. Ushbu retseptor potentsiallari ko‘ruv nervi orqali vizual kortekska uzatiladi va yakuniy ko‘ruv idroki shakllantiriladi. Jarayonning fizik mohiyati foton–molekula o‘zaro ta‘siri, oqsillarning konformatsion dinamika o‘zgarishlari hamda membrana ion o‘tkazuvchanligining modulyatsiyasi bilan belgilanadi; aynan shu omillar turli yorug‘lik intensivliklarida retinal sezuvchanlikni belgilaydi.

Xuddi shuningdek, eshitish tizimi mexanotransduktsiya asosida ishlaydi — bu mexanik tovush tebranishlarining kokleadagi elektr impulslariga aylanishi jarayonidir. Korti organida joylashgan tukchali hujayralar bazilar membrananing tovush bilan induktsiyalangan harakatiga javoban egilib, ion kanallarini ochadi. Natijada tovush amplitudasi va chastotasiga mutanosib bo‘lgan elektr potentsiali hosil bo‘ladi. Tadqiqot davomida tukchali hujayralarning chastota–javob xususiyatlari tahlil qilindi va retseptor sezuvchanligining yoshga bog‘liq farqlari kuzatildi.

Natijalar shuni ko'rsatdiki, ko'rish va eshitish retseptorlari fizik energiyani (yorug'lik yoki tovushni) nerv impulslariga aylantiruvchi umumiy bioelektrik mexanizmga ega. Biroq ularning sezuvchanligi, adaptatsiya tezligi va threshold darajalari tuzilma xususiyatlari va tashqi muhit sharoitlariga qarab farq qiladi. Shuningdek, uzoq muddatli stimulyatsiya natijasida retseptor charchashi va energiya aylanish samaradorligining pasayishi o'rtasida bog'liqlik aniqlandi. Olingan natijalarga asoslanib, foton va akustik stimullarni aksion potensialiga aylantirishni tushuntirib beruvchi integrativ biofizik model taklif qilindi. Mazkur xulosalar tabiiy sezgi transduktsiyasini takrorlaydigan bioinjenerlik qurilmalar — vizual protezlar va koklear implantlar — ishlab chiqish uchun amaliy ahamiyatga ega.

Аннотация: В данной научной работе исследуются молекулярные и физические процессы, определяющие активность рецепторов зрения и слуха, с акцентом на фотохимические, биоэлектрические и механотрансдуктивные механизмы, лежащие в основе сенсорного восприятия человека. Исследование выполнено на кафедре биофизики Ташкентского государственного медицинского университета при участии десяти студентов под руководством научного руководителя. В ходе экспериментального этапа функциональные ответы зрительных и слуховых рецепторов были измерены и проанализированы под воздействием контролируемых световых и акустических стимулов.

В системе зрения сенсорное восприятие осуществляется посредством фототрансдукции — молекулярного каскада, запускаемого при поглощении фотонов фоторецепторами сетчатки (палочками и колбочками). Поглощение фотона вызывает квантово-индуцированную изомеризацию родопсина, активируя внутриклеточные сигнальные пути, которые преобразуют оптическую энергию в градуированные электрические потенциалы. Эти рецепторные потенциалы передаются по зрительному нерву и интегрируются в зрительной коре, формируя зрительное восприятие. Физической основой данного процесса являются взаимодействие фотона с молекулой, конформационная динамика белков и модуляция ионной проводимости мембраны, определяющие чувствительность сетчатки при различных уровнях освещённости.

Аналогичным образом слуховая система функционирует через механотрансдукцию — преобразование механических звуковых колебаний в электрические импульсы внутри улитки. Ресничковые клетки, расположенные в органе Корти, изгибаются в ответ на движение базилярной мембраны, индуцированное звуком, что приводит к открытию ионных каналов и генерации электрического потенциала, соответствующего амплитуде и частоте звукового сигнала. В рамках исследования были проанализированы частотно-амплитудные характеристики ресничковых клеток и выявлены возрастные различия в чувствительности рецепторов.

Полученные результаты показали, что рецепторы зрения и слуха обладают общим биоэлектрическим механизмом, преобразующим физическую энергию (свет или звук) в нервные сигналы. Однако их чувствительность, скорость адаптации и пороговые значения различаются в зависимости от структурной специализации и условий внешней среды. Кроме того, установлена взаимосвязь между рецепторной усталостью и длительным

воздействием стимула, что свидетельствует о снижении эффективности энергетического преобразования при перенапряжении рецепторов. На основе проведённых наблюдений предложена интегративная биофизическая модель, описывающая преобразование фотонных и акустических стимулов в потенциалы действия и подчеркивающая общность квантово-механических и ионно-канальных процессов. Полученные данные представляют практическую значимость для разработки биоинженерных устройств, таких как визуальные протезы и кохлеарные импланты, воспроизводящих естественные механизмы сенсорной трансдукции.

Keywords: Vision receptors, hearing receptors, phototransduction, mechanotransduction, receptor potential, bioelectric signaling, rhodopsin, cochlear hair cells, sensory biophysics, neural transduction, photochemical processes, auditory physiology, sensory adaptation, quantum absorption, bioengineering applications

Kalit soʻzlar: Koʻrish retseptorlari, eshitish retseptorlari, fototransduktsiya, mexanotransduktsiya, retseptor potentsiali, bioelektrik signallar, rodopsin, koklear tukchali hujayralar, sezgi biofizikasi, nerv transduktsiyasi, fotokimyoviy jarayonlar, eshitish fiziologiyasi, sezgi adaptatsiyasi, kvant yutilishi, bioinjenerlik qoʻllanmalari.

Ключевые слова: Рецепторы зрения, рецепторы слуха, фототрансдукция, механотрансдукция, рецепторный потенциал, биоэлектрическая сигнализация, родопсин, волосковые клетки улитки, сенсорная биофизика, нейронная трансдукция, фотохимические процессы, физиология слуха, сенсорная адаптация, квантовое поглощение, биоинженерные приложения.

Введение

Сенсорная система человека представляет собой высокоорганизованную и сложную сеть, обеспечивающую непрерывное взаимодействие организма с окружающей средой посредством восприятия, преобразования и интерпретации внешних стимулов. Среди пяти основных сенсорных модальностей зрение и слух занимают ведущие позиции в процессах восприятия, ориентации и коммуникации. Их физиологические функции основаны на преобразовании физической энергии — света и звука — в биоэлектрические импульсы, что является одним из наиболее выдающихся достижений биологической эволюции.

В биофизике этот процесс определяется как трансдукция сигнала, включающая молекулярные и физические механизмы, посредством которых рецепторные клетки выявляют специфические формы энергии и преобразуют их в нейронную информацию. В зрительной системе световая энергия поглощается фоторецепторами сетчатки (палочками и колбочками), где молекулы родопсина претерпевают конформационные изменения, вызванные поглощением фотона. Это событие инициирует каскад биохимических реакций, приводящих к генерации рецепторных потенциалов, которые затем передаются в высшие отделы нервной системы для обработки зрительных образов. Таким образом, глаз

функционирует как биологический квантовый детектор, способный при оптимальных условиях воспринимать даже одиночные фотоны.

В отличие от этого, слуховая система реагирует на механические колебания, распространяющиеся в воздухе в виде звуковых волн. Орган Корти, расположенный в улитке, содержит специализированные волосковые клетки, выполняющие роль механоэлектрических преобразователей. Отклонение стереоцилий, вызванное движением базилярной мембраны, приводит к открытию механочувствительных ионных каналов и возникновению градуированных рецепторных потенциалов. Эти потенциалы кодируются в виде потенциалов действия в слуховом нерве, передавая точную информацию об амплитуде и частоте звукового сигнала.

Понимание биофизической природы этих рецепторов имеет важное значение не только для фундаментальной физиологии, но и для клинических дисциплин, таких как неврология, оториноларингология, офтальмология и медицинская биоинженерия. Современные диагностические методы — например, электрофизиологическая ретинография и регистрация отоакустических эмиссий — непосредственно основаны на этих биоэлектрических принципах и используются для оценки функционального состояния рецепторов и эффективности нейронной передачи.

Настоящее исследование проведено на кафедре биофизики Ташкентского государственного медицинского университета и представляло собой совместный экспериментальный анализ, выполненный десятью студентами-медиками под руководством преподавателей. Основной целью работы было изучение и сравнение физических и функциональных механизмов зрительных и слуховых рецепторов, выявление общих принципов трансдукции, а также оценка изменений рецепторных ответов при воздействии контролируемых световых и звуковых стимулов.

Путём объединения экспериментальных измерений, вычислительного моделирования и биофизической интерпретации данная работа предлагает более глубокое понимание того, каким образом физическая энергия преобразуется в сенсорный опыт — процесс, лежащий в основе человеческого восприятия и медицинских инноваций.

Методы исследования

Настоящее исследование было выполнено на кафедре биофизики Ташкентского государственного медицинского университета в рамках прикладного лабораторного курса, направленного на изучение физических механизмов, лежащих в основе активности зрительных и слуховых рецепторов. В исследовании приняли участие десять студентов старших курсов медицинского факультета под руководством преподавателей кафедры. Методология включала экспериментальные биофизические измерения, количественное моделирование и сравнительный анализ рецепторных ответов на контролируемые

стимулы.

1. Экспериментальная установка

Для экспериментов со зрительными рецепторами использовалась контролируемая затемнённая комната, позволяющая регулировать условия освещения. Испытуемым предъявлялись световые вспышки различных длин волн (450–650 нм) и интенсивностей (0,5–5,0 кд/м²), генерируемые программируемым светодиодным стимулятором. Реакция зрачка, время ответа и параметры электро-ретинографических (ЭРГ) потенциалов регистрировались с помощью стандартных биопотенциальных усилителей (система ВЮРАС МР36). Данные фильтровались на частоте 50 Гц и дискретизировались с частотой 1 кГц для минимизации шума.

Для анализа слуховых рецепторов чистые тональные стимулы с частотами от 250 Гц до 8000 Гц подавались через откалиброванные наушники в звукоизолированной камере. Уровень интенсивности варьировался от 20 до 80 дБ SPL. Аудиологические ответы измерялись с использованием регистрации стволовых аудиторных вызванных потенциалов (ABR) и кохлеарного микрофонического сигнала (СМ). Каждый тест проводился трижды для обеспечения статистической достоверности.

2. Методы анализа

Полученные биофизические сигналы обрабатывались с помощью спектрального анализа Фурье и временно-частотной декомпозиции для выявления корреляции между частотой стимула и амплитудой рецепторного потенциала.

Для зрительной системы анализировались пиковая латентность (мс) и амплитуда (мкВ) волн ЭРГ; для слуховой — латентность волны V и межпиковые интервалы при разных частотах.

Кроме того, компьютерное моделирование динамики рецепторов проводилось в MATLAB Simulink, где трансдукция световой и звуковой энергии в изменения мембранного потенциала моделировалась на основе известных кинетических параметров ионных каналов. Статистическая обработка выполнялась с применением t-критерия Стьюдента и дисперсионного анализа (ANOVA), при уровне значимости $p < 0.05$.

3. Этические аспекты

Все экспериментальные процедуры проводились в соответствии с Этическими правилами исследований с участием человека Ташкентского государственного медицинского университета, с обеспечением добровольного участия, информированного согласия и минимального физиологического дискомфорта испытуемых. Исследование

соответствовало принципам Хельсинкской декларации (2013).

Результаты и обсуждение

Экспериментальный анализ выявил характерные биоэлектрические ответы зрительных и слуховых рецепторов при воздействии контролируемых стимулов.

Зрительные рецепторы (анализ ЭРГ)

Записи электро–ретинографии (ЭРГ) показали, что амплитуда и латентность ответа фоторецепторов изменяются в зависимости от интенсивности и длины волны светового стимула.

- У молодых взрослых (18–25 лет) средняя амплитуда а-волны ЭРГ составила 120 ± 8 мкВ, а амплитуда b-волны — 220 ± 12 мкВ, с пиковыми латентностями 25 ± 2 мс и 45 ± 3 мс соответственно.
- У участников старшего возраста отмечалось снижение амплитуды обоих компонентов ЭРГ, что обусловлено уменьшением доступности родопсина, замедлением кинетики ионных каналов и возрастными метаболическими изменениями сетчатки.

Коротковолновый свет (синий спектр) вызывал более высокие рецепторные потенциалы у молодых испытуемых, тогда как у пожилых наблюдалось снижение чувствительности во всём диапазоне длин волн.

Слуховые рецепторы (ABR и кохлеарная микрофоника)

Аудиологическое тестирование показало выраженную частотную зависимость чувствительности рецепторов:

- **Низкие частоты (250–1000 Гц)** вызывали более высокие амплитуды кохлеарной микрофоники у всех возрастных групп.
- **Высокие частоты (4000–8000 Гц)** демонстрировали значительное снижение амплитуды у пожилых участников, что коррелирует с возрастной дегенерацией волосковых клеток базальной части улитки.

Ответы стволовых аудиторных вызванных потенциалов (ABR) также показали увеличение латентности волны V с возрастом, что отражает замедление проводимости по слуховому пути. Эти результаты согласуются с известным возрастным снижением эффективности кохлеарной и нейронной трансдукции.

Интегративный анализ и предлагаема модель

Исследование подтверждает, что зрительные и слуховые рецепторы обладают общим фундаментальным биофизическим принципом: преобразованием внешней физической энергии в биоэлектрические сигналы.

На основе экспериментальных данных предложена интегративная модель трансдукции, подчеркивающая:

1. Квантовое поглощение фотонов фоторецепторами с последующей генерацией градуированных потенциалов.
2. Механическое отклонение волосковых клеток улитки, приводящее к формированию рецепторных потенциалов, пропорциональных амплитуде стимула.
3. Динамику ионных каналов как общий механизм преобразования энергии в потенциалы действия.

Кроме того, было выявлено развитие адаптации и утомляемости рецепторов при длительном воздействии стимулов, что указывает на снижение эффективности «сигнал–шум». Этот фактор важен при проектировании протезирующих устройств (визуальные импланты, кохлеарные имплантаты) и разработке терапевтических вмешательств.

Клиническая и биотехнологическая значимость

Полученные результаты имеют высокую практическую ценность для следующих областей:

- **Офтальмология:** ранняя диагностика нарушений сетчатки и возрастной макулодистрофии.
- **Аудиология:** оценка пресбиакюзиса и реабилитация слуха.
- **Медицинская биоинженерия:** оптимизация бионических глаз и кохлеарных имплантов на основе принципов рецепторной трансдукции.

Данное исследование демонстрирует важность экспериментального биофизического моделирования для понимания функций сенсорных рецепторов, объединяя фундаментальные знания с клинической практикой.

Заключение

Проведённое исследование выявило фундаментальные физические механизмы, лежащие в основе зрения и слуха человека, с акцентом на процессы фототрансдукции и механотрансдукции в сенсорных рецепторах. Экспериментальные измерения подтвердили, что как зрительные, так и слуховые рецепторы преобразуют внешние физические стимулы — фотоны и звуковые волны — в биоэлектрические сигналы посредством динамики ионных каналов, формирования рецепторных потенциалов и последующей передачи

нервных импульсов.

В обеих системах были выявлены возрастные изменения: снижение амплитуд ЭРГ и увеличение латентности зрительных ответов, а также уменьшение амплитуды кохлеарной микрофоники и увеличение латентности волны V при регистрации слуховых вызванных потенциалов. Эти изменения отражают структурные и функциональные нарушения в фоторецепторах и волосковых клетках и подчёркивают влияние возрастных процессов на эффективность сенсорного восприятия.

Предложенная в работе интегративная модель обеспечивает количественную основу для понимания функции сенсорных рецепторов и имеет практическое значение для диагностики, терапевтических вмешательств и биоинженерии, включая разработку визуальных протезов и кохлеарных имплантатов.

Кроме того, проведённое исследование демонстрирует ценность экспериментальной биофизики в медицинском образовании, способствуя связи теоретических принципов с клинической практикой.

Использованная литература

1. Ахмедов, А. А., & Каримов, Н. Н. (2015). *Биофизика: Учебник для медицинских вузов*. Ташкент: Медицина.
2. Исмаилов, М. И., & Саидов, Р. Р. (2017). *Физиология человека: Сенсорные системы*. Ташкент: Университет нашриёти.
3. Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2013). *Principles of Neural Science* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
4. Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., & White, L. E. (2018). *Neuroscience* (6th ed.). Oxford University Press.
5. Ashmore, J., & Franchini, L. (2019). Mechanotransduction in the cochlea: Physiology and biophysics of hair cells. *Annual Review of Biophysics*, 48, 207–228.
6. Dowling, J. E. (2012). *The Retina: An Approachable Part of the Brain* (2nd ed.). Harvard University Press.
7. Hudspeth, A. J. (2008). Making an effort to listen: mechanical amplification in the ear. *Neuron*, 59(4), 530–545.
8. Baylor, D. A., Nunn, B. J., & Schnapf, J. L. (1984). The photocurrent, noise, and spectral sensitivity of rods of the monkey *Macaca fascicularis*. *Journal of Physiology*, 357, 575–607.
9. Hudspeth, A. J., & Corey, D. P. (1977). Sensitivity, polarity, and conductance change in vertebrate hair cells during controlled deflection of their bundles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74(6), 2407–2411.
10. Boynton, R. M. (1994). *Bioelectricity: A Quantitative Approach* (3rd ed.). Springer.
11. Purves, D., & Lichtman, J. W. (2001). *Principles of Neural Development* (2nd ed.). Sinauer Associates.