

СОДЕРЖАНИЕ

Том 36, номер 3, 2022

Зрительная система

- Зависимость результатов оценки фузионных резервов от метода измерения, инструментария и параметров тестовых стимулов
Н. Н. Васильева, Г. И. Рожкова, М. А. Грачева, А. С. Большаков 199
- Регулярность расположения ганглиозных клеток в сетчатке дельфина увеличивается в постнатальном онтогенезе
А. М. Масс, А. Я. Сунин 218
- Влияние спектральной составляющей повседневного освещения на формирование структур глаза японского перепела *Coturnix japonica*
Н. Н. Трофимова, Ю. С. Петронюк, Т. С. Гурьева, Е. И. Медникова, П. П. Зак 226
-

Слуховая система

- Противоречия в данных электрофизиологических и поведенческих экспериментов на примере результатов тестирования слуховой системы бабочек – совков (*Lepidoptera, Noctuidae*)
Д. Н. Лапшин 234
- Интерауральная последовательная маскировка в слуховой системе дельфина
В. В. Попов, Д. И. Нечаев, А. Я. Сунин, Е. В. Сысуева 244
-

Технические сенсорные системы

- Радиосенсорная техническая диагностика сложного электронного узла
К. А. Бойков 252
- Точность определения координат надводной поверхности на основе фотограмметрических измерений снимка с наклонной проекцией
А. В. Кваснов 262
- Моделирование сигнального повторителя радиоимпульсов для систем радиосенсорной аутентификации
А. В. Шильцин, М. С. Костин 275
-
- Правила для авторов журнала “Сенсорные системы” 282
-

Contents

Vol. 36, No. 3, 2022

Visual system

- Dependence of the results of the assessment of fusion reserves on the measurement method, tools and parameters of test stimuli
N. N. Vasilyeva, G. I. Rozhkova, M. A. Gracheva, A. S. Bolshakov 199
- Ganglion cell regularity in the dolphin's retina improves during the postnatal ontogenesis
A. M. Mass, A. Ya. Supin 218
- Influence of spectral components of daily lighting on eye structures formation for japanese quail *coturnix japonica*
N. N. Trofimova, Y. S. Petronyuk, T. S. Guryeva, E. I. Mednikova, P. P. Zak 226

Auditory system

- Mismatch between electrophysiological and behavioral measurements: example from auditory system of noctuid moths (Lepidoptera, Noctuidae)
D. N. Lapshin 234
- Interaural forward masking in the auditory system of a dolphin
V. V. Popov, D. I. Nechaev, A. Ya. Supin, E. V. Sysueva 244

Technical sensory systems

- Radio-sensor technical diagnosis complex electronic assembly
K. A. Boikov 252
- Accuracy of the coordinates for underlying surface based on photogrammetric measurements of the images with an oblique projection
A. V. Kvasnov 262
- Simulation of signal repeater of radio pulses for radio-sensor authentication systems
A. V. Shiltsin, M. S. Kostin 275
- Index 282
-

**ЗРИТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА**

УДК 612.84 + 617.7 + 617-7

**ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ФУЗИОННЫХ РЕЗЕРВОВ
ОТ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ, ИНСТРУМЕНТАРИЯ И ПАРАМЕТРОВ
ТЕСТОВЫХ СТИМУЛОВ**© 2022 г. Н. Н. Васильева^{1,*}, Г. И. Рожкова¹, М. А. Грачева¹, А. С. Большаков¹¹ *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН
127994 Москва, Большой Каретный пер., д. 19/1, Россия***E-mail: nn_vasilyeva@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 11.04.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Среди офтальмологов и специалистов по зрительному восприятию до сих пор нет единого мнения относительно различных методов и процедур измерения фузионных резервов (ФР), хотя ФР входят в число базовых показателей для оценки состояния бинокулярного зрения у пациентов и для дифференциальной диагностики его нарушений. Это объясняется сложностью взаимодействия сенсорных, аккомодационных и окуломоторных механизмов зрения в процессе реализации теста и особенностями этого взаимодействия при проведении тестирования с использованием различных инструментов и процедур измерения. Тем не менее разбираться в этих сложностях необходимо, поскольку для эффективного и корректного использования показателей ФР с целью совершенствования методов их оценки и диагностических критериев нужно четко понимать суть тестирования и степень влияния различных факторов на результаты измерений. Одним из способов продвижения в этом направлении является сравнение данных оценки ФР, полученных разными методами на одних и тех же испытуемых или одним и тем же методом в разных группах. Такие работы ведутся, но число их пока невелико. В настоящей статье проведен сравнительный анализ результатов, полученных при помощи традиционных измерений ФР на синоптофоре и на компьютеризированных установках с использованием специальных интерактивных программ. Обсуждаются преимущества и недостатки различных методов, перспективы их улучшения и стандартизации.

Ключевые слова: бинокулярное зрение, фузионные резервы, аккомодация, вергенция, синоптофор, призматическая линейка, компьютерные методы оценки зрительных функций, способы сепарации частей стереопары

DOI: 10.31857/S023500922203009X**ВВЕДЕНИЕ**

Как известно, объемно-пространственный зрительный образ рассматриваемого окружения является результатом функционирования сенсорных, окуломоторных, аккомодационных и проприоцептивных механизмов, связанных с органами зрения, а также последующей многоуровневой интегративной обработки информации, поступающей от них в мозговые отделы зрительной системы. При этом следует отметить, что в бинокулярных условиях восприятия, т.е. при наблюдении объекта двумя глазами с двух разных точек зрения, у человека в норме формируется более полный трехмерный образ, чем при монокулярном восприятии. Это достигается благодаря механизмам бинокулярной фузии, обеспечивающим процесс совместной обработки двух потоков монокулярной информации, включающий оцен-

ку их соответствия одним и тем же объектам и формирование единого видимого образа.

Функциональным показателем, количественно характеризующим совместную работу окуломоторных, аккомодационных и сенсорных механизмов фузии, прочность и помехоустойчивость сфузированных образов, являются фузионные резервы (ФР). Оценка ФР в комплексе с другими показателями функционирования зрительной системы имеет большое значение для прогнозирования успехов в овладении учебными навыками в детском возрасте, поддержания зрительной работоспособности при выполнении учебных и профессиональных задач, достижения физиологического комфорта при использовании современными 3D технологиями (Васильева, Рожкова 2009; Корнюшина, 2014; Клокова и др., 2019; Васильева, 2021; Vasilyeva, Rozhkova, 2008; Anderson

et al., 2011; Sreenivasan et al., 2016; Rucker, Phillips, 2018; Alrasheed, 2020b).

Недостаточность ФР может проявляться астенопическими явлениями, возникновением спазма аккомодации, развитием и прогрессированием миопии (Гули-Заде, 1979; Балабаева, Матросова, 2020; Jorge et al., 2008; Piano, O'Connor, 2013; Alrasheed, 2020a). Типичные симптомы астенопии: ощущение усталости глаз, двоение, потеря резкости воспринимаемой сцены, искажение формы и величины воспринимаемых объектов и, как следствие, — снижение зрительной работоспособности. Соответственно, увеличение ФР посредством специальных тренировок проявляется в уменьшении астенопических жалоб и повышении качества жизни пациентов (Евсеева, Кузнецов, 2012; Кашура и др., 2012; Овечкин, 2015; 2019; Тарутта и др., 2018; Корнюшина, 2019; Балабаева, Матросова, 2020; Aziz et al., 2006; Ajrezo et al., 2016; Rucker, Phillips, 2018).

В функциональной диагностике задача адекватного измерения ФР у детей и взрослых приобретает все большую актуальность для создания оптимальных режимов зрительной работы в процессе обучения и профессиональной деятельности, разработки офтальмоэргономических рекомендаций и обоснования подходов к тренировке ослабленных зрительных функций. Принцип измерения ФР подразумевает оценку способности зрительной системы сохранять единый сфокусированный бинокулярный образ объекта при постепенном искусственном увеличении рассогласования между аккомодацией и конвергенцией. Рассогласование достигается отклонением угла между зрительными осями от значения, соответствующего точной бификсации физического стимула. Наиболее прямой способ получить такое рассогласование — это поставить перед глазами призмы, отклоняющие входящие в глаз лучи к виску или к носу. Если при этом дается задание сохранять фиксацию взора на исходном объекте, т.е. удерживать его изображение на фовеа, человеку приходится повернуть каждый глаз в соответствии с отклонением лучей и рассматривать объект в условиях избыточной конвергенции или дивергенции зрительных осей. В таких условиях сохранение сфокусированного единого бинокулярного образа объекта возможно лишь в пределах определенного интервала углов конвергенции и дивергенции, за границами которого наступает нарушение фузии и двоение — распад бинокулярного образа на два монокулярных. Предельно выносимые до нарушения фузии конвергентные и дивергентные нагрузки и принято называть фузионными резервами — конвергентными (положительными) и дивергентными (отрицательными) соответственно.

В научной работе и клинической практике исследователи применяют различные способы измерения ФР (Кашенко, 1966; Сомов, 1989; 2014; Cooper et al., 2000; Antona, 2008; Oganyan et al., 2009; Rozhkova, Vasilyeva, 2010; Conway et al., 2012; Elliott, 2020; Askarizadeh et al., 2022). Общепринятых стандартных тестов для оценки ФР в настоящее время нет, наибольшее применение получили три метода: призмный, синоптофорный и компьютерный. Особенности этих методов более подробно рассматриваются в разделе “Материалы и методы”.

Для развития современных представлений о зрительных механизмах, создания основ стандартизации измерений и отбора методов для массовых скрининговых либо комплексных лонгитюдных исследований, одними из важных задач являются систематизация имеющихся данных, сравнительный анализ результатов измерений ФР разными методами и исследование влияния различных факторов на работу механизмов фузии. Корректное и эффективное использование результатов оценки ФР требует их правильной интерпретации и понимания различий, обусловленных различиями инструментов и процедур измерения. В настоящее время это осознают как врачи, так и исследователи зрительного восприятия, что приводит к увеличению числа публикаций по сопоставлению разных методов. Зарубежные публикации большей частью посвящены влиянию условий тестирования на результаты оценки ФР, а также сравнению результатов, полученных при помощи призмного метода и синоптофора (Antona et al., 2008; Goss, Becker, 2011; Conway et al., 2012; Fu et al., 2015; Lança, Rowe, 2016; 2019; Fray, 2017).

В настоящей статье проведен анализ различных методов измерения ФР: призмного, синоптофорного и компьютерного, которые применяются на современном этапе. Анализ подкрепляется сравнением данных оценки ФР человека, полученных нами при помощи классической процедуры с использованием синоптофора, и при помощи интерактивных компьютерных программ, позволяющих проводить измерения с использованием цветовой и поляризационной сепарации левого и правого тестовых изображений. Проанализировано влияние методов измерения на получаемые результаты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнение существующих методов измерения фузионных резервов

Для понимания причин расхождения в результатах, получаемых при использовании различных методов измерения ФР, сначала необходимо более конкретно проанализировать различия в схе-

мах соответствующих процедур. В этом разделе проведен анализ не только синоптофорного и компьютерного методов, которые использовались нами в экспериментальной работе, но и призмного метода — исторически более раннего и более понятного. В основе всех методов лежит искусственное нарушение соответствия между аккомодацией и конвергенцией, которые в нормальных условиях взаимосвязаны, обеспечивая оптимальные условия фокусировки и проецирование рассматриваемого объекта на фoveальные области обоих глаз. В естественных условиях рассогласование вызывает аккомодативную конвергенцию или конвергентную аккомодацию: рефлекторное изменение конвергенции при изменении аккомодации и рефлекторное изменение аккомодации при изменении конвергенции.

Анализ процедур измерения ФР. Схемы проведения измерений ФР различными методами представлены на рис. 1.

1. Призмный метод (рис. 1, а). Рабочий инструмент — набор призм нарастающей силы, скомпонованных в одной рамке (призменная линейка) и позволяющих осуществлять ступенчатые изменения вергенции за счет быстрого сдвига линейки вверх либо вниз для смены одной призмы на другую. Оптометристы, имеющие интерес к этой области, предпочитают использовать вращающуюся призму Risley (для градуального изменения вергенции) либо в монокулярных условиях, либо бинокулярно на фороптере.

Данный метод применим для любых расстояний тестирования, но обычно ФР измеряют в условиях наблюдения тестового объекта (ТО), расположенного вблизи (на расстояниях 33 или 40–50 см) либо вдали (на расстояниях 5 или 6 м). В качестве ТО используют простые изображения: вертикальные отрезки; буквенные оптоотипы для остроты зрения 0.1 (по десятичной шкале); небольшие трехмерные предметы.

Перед измерением ФР испытуемому ставят задачу: фиксировать ТО двумя глазами и сохранять единый видимый образ при установке призм нарастающей силы перед одним из глаз или перед обоими глазами. В процессе измерения, увеличивая силу призм, поставленных основаниями к носу или к виску, отмечают моменты появления размытости образа (blur-point) и разрушения фузии — распада бинокулярного образа (break point), а затем, уменьшая силу призм, — момент восстановления фузии (recovery point). Точка размытости соответствует моменту, когда насильно изменяемая при помощи призм конвергенция приводит к значительному изменению аккомодации и тест-объект расплывается. Точка потери фузии соответствует моменту, когда рассогласование между аккомодацией и вергенцией становится

запредельным для возможности сохранения единства образа, и он распадается на два.

Физический ТО, бинокулярный образ которого нужно удерживать, реально неподвижен, а призмы меняют направление лучей от него, заставляя глаза поворачиваться, менять угол вергенции и формировать видимый образ на другом расстоянии от глаз (предположительно в точке пересечения зрительных осей). Отсчет поворотов осей (из-за установки перед глазами призм) идет от исходного положения глаз, соответствующего фиксации ТО. Углы поворота вычисляются по оптической силе призм. Максимальное значение силы призм (или соответствующий угол отклонения лучей), при котором человек способен сохранять единый бинокулярный образ, принимают за меру фузионных резервов.

2. Синоптофорный метод (рис. 1, б). Измерения проводятся на синоптофоре — гаплоскопическом приборе, обеспечивающем раздельное предъявление левого и правого изображений. В клинической практике синоптофор применяется на протяжении нескольких десятилетий. Спектр исследовательских и офтальмологических задач, которые можно решать с его помощью, достаточно широк: оценка способности к бифовеальному слиянию, измерение угла косоглазия, фузионных резервов, выявление и ликвидация функциональной скотомы, проведение лечебных ортооптических упражнений.

В приборе имеются раздельные каналы наблюдения для левого и правого глаза, через которые ТО могут демонстрироваться в трех режимах: стационарное предъявление, колебания в горизонтальном направлении и мелькания. В стандартной комплектации синоптофор снабжается слайдами с парными ТО, которые представлены тремя группами:

- объекты на совмещение, не имеющие общих элементов (например, окружность и вписываемая в нее звезда, цыпленок и яйцо, автомобиль и гараж);

- объекты на слияние — силуэтные фигурки с центральным общим элементом (например, две кошки, одна из которых имеет уши, но не имеет хвоста, а вторая имеет хвост, но не имеет ушей);

- объекты для наблюдения стереоскопического объема и блеска (например, стереопары с различной диспаратностью и пары картинок, в которых детали левого и правого изображений различаются по яркости/контрасту).

Для измерения ФР в офтальмологии обычно применяют объекты на слияние. Соответствующие слайды с ТО вставляются в гнезда (отверстия), расположенные в оптических головках прибора. Оптически ТО находятся в бесконечности. Необходимые измерения ФР достигаются плавными изменениями положения оптических

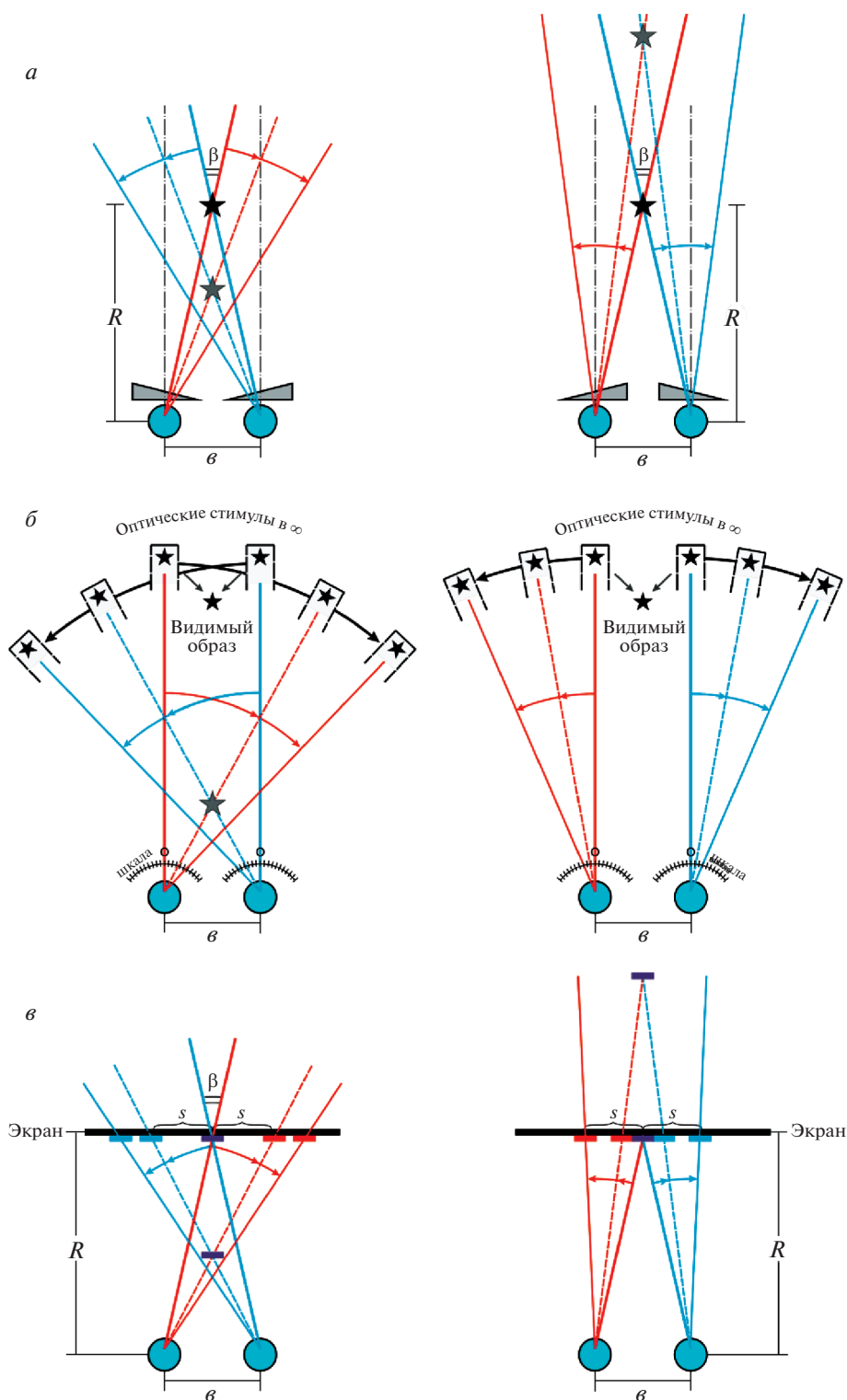


Рис. 1. Схемы измерения конвергентных (левый столбец) и дивергентных (правый столбец) ФР с использованием трех различных методов: призмного — *а*; синоптофорного — *б*; компьютерного — *в*. R — расстояние до ТО; β — начальный угол конвергенции; ϑ — межзрачковое расстояние (базис); s — смещение левой и правой частей стереопары.

осей — поворотами оптических головок со слайдами в горизонтальной плоскости, вызывающими сведение либо разведение зрительных осей, и соответственно, избыточную конвергенцию/ди-

вергенцию. Таким образом, при измерении ФР расстояние до ТО не меняется, но они движутся по дугам влево-вправо, заставляя поворачиваться за ними глаза и менять угол вергенции. На рис. 1, б

Таблица 1. Различия в условиях наблюдения тест-объектов при разных методах измерения ФР

Метод измерения ФР	Угловой размер физического тест-объекта	Позиция физического тест-объекта	Расстояние для аккомодации	Сепарация левого и правого изображений
Призмный Синоптофорный	Неизменный Неизменный	Неизменная Меняется в соответствии с углом поворота оптических головок	Неизменное Неизменное (оптическая бесконечность)	Оптическая Механическая
Компьютерный	Уменьшается с удалением от 0° — позиции оси глаза	Меняется в соответствии с движением тест-объекта по экрану	Увеличивается с удалением от позиции параллельности осей глаз	Цветовая или поляризационная

ТО показаны как звездочки в конце труб-каналов, как бы находящиеся в бесконечности на зрительных осях. Исходный видимый образ показан как сфузирванный при параллельных осях и располагающийся “несколько ближе бесконечности”. Отсчет поворотов осей идет от их исходного параллельного положения. Для измерения поворотов осей прибор имеет шкалы на окружностях, центры которых теоретически совпадают с центрами вращения глаз. Предусмотренной конструкцией синоптофора оптическое удаление ТО в бесконечность позволяет измерять фузионные резервы только для дали.

Современные модели синоптофоров значительно усовершенствованы и имеют расширенный функционал, в них встроен электронный блок управления, имеется удобная клавиатура с подсветкой, что позволяет сделать работу более комфортной и неустойчивой.

3. *Компьютерный метод* (рис. 1, в). Интерактивные компьютерные программы на основе того или иного метода сепарации изображений для левого и правого глаза позволяют генерировать на дисплеях самые разнообразные ТО и проводить оценку ФР, наблюдая образы, формирующиеся при симметричном расхождении левого и правого стимулов по горизонтали, и отмечая моменты появления размытости и раздвоения видимого образа. Программируемое расхождение тестовых стимулов имитирует установку перед глазом призм, отклоняющих световые лучи (точнее — призм Risley, позволяющих делать это градуально). Расстояние до стимулов несколько увеличивается при их удалении от позиции, соответствующей параллельности осей глаз. Отсчет поворотов осей идет от исходного положения бификсации ТО в центре экрана.

В существующих интерактивных компьютерных программах применяется большой набор ТО (геометрические фигуры, изображения животных и предметов, случайно-точечные стереограммы) и предусмотрены разные методы сепарации —

цветовая или поляризационная. Использование в качестве стимулов случайно-точечных стереограмм (СТС) позволяет контролировать сохранение у испытуемых способности к формированию полноценных стереообразов на основе бинокулярной диспаратности на всем протяжении измерения до момента распада сфузирванного образа при достижении критических углов конвергенции/дивергенции.

В настоящее время в офтальмологии большое распространение получили методы, основанные на временной (затворной, эклипсной) технологии сепарации изображений. Например, технология shutter glasses подразумевает использование двух фильтров на основе жидких кристаллов, обеспечивающих попеременное открывание/закрывание левого и правого каналов стимуляции под действием управляющего сигнала, синхронизированного с попеременным предъявлением левого и правого изображений. Однако использовать такую технологию при измерении ФР проблематично.

В отечественной клинической практике широкое применение получила программа “Клинок”, основанная на цветовой сепарации и созданная в начале 90-х годов XX в. для замены синоптофора. Она входит в состав интегрированного лечебно-диагностического комплекса “Академик” (Рожкова и др., 1996). Программа “Клинок” в отличие от синоптофора имеет большее количество ТО и позволяет расширить временной и скоростной диапазоны традиционных измерительных и тренировочных аппаратных процедур (Рожкова и др., 1996; Ефимова, Сомов, 2010; Кононова, Сомов, 2018).

Особенности обсуждаемых методов измерения ФР, существенные для анализа различий в получаемых результатах, кратко суммированы в табл. 1.

В научных публикациях и руководствах для оптометристов нормативы по фузионным резервам выражаются в угловых градусах или призмных

ных диоптриях. Перевод значения силы призмы в угол отклонения лучей при измерении ФР осуществляется по формуле:

$$\sigma = \arctg(W/100),$$

где σ — угол отклонения лучей, а W — сила призмы в призмённых диоптриях, поскольку, согласно определению, W численно равна расстоянию в сантиметрах, на которое отклоняется световой луч на расстоянии 1 м (100 см) от призмы (Сергиенко, 1991).

Данные о ФР офтальмологически здоровых детей и взрослых, представленные в научных публикациях и справочных пособиях, свидетельствуют, что единого мнения о возрастных нормах и возрастной динамике в литературе нет. В Федеральных клинических рекомендациях по диагностике и лечению содружественного косоглазия (2015) для всех детей приводятся единые средние значения ФР, измеряемых на синоптофоре для

теста № 2 (кошки): конвергентные резервы — $16 \pm 8^\circ$; дивергентные — $5 \pm 2^\circ$.

Для удобства читателей приведем нормативы по ФР, выраженные в призматических диоптриях и угловых градусах, из отечественной и зарубежной литературы. Хотя по нашим данным ФР существенно зависят от возраста, в имеющихся публикациях приводятся обобщенные данные для определенных возрастных групп детей и взрослых.

Соответствующие примеры приведены в табл. 2 и 3.

Условия проведения собственных измерений

Испытуемые. В процессе сбора данных было обследовано 354 человека в возрасте от 7 до 39 лет. Работа проводилась в период с 2009 по 2021 гг. в лаборатории “Зрительные системы” ИППИ РАН и на базе образовательных учреждений г. Чебоксары и Москвы.

Таблица 2. Нормативные данные по фузионным резервам из руководства по оптометрической клинической практике (Cooper et al., 2000)

Англоязычная терминология / Перевод	Среднее (призм. дптр)	Стандартное отклонение (призм. дптр)	Диапазон (призм. дптр)	Среднее значение (угл.град.)
для дали				
Base-in blur / дивергентные ФР — появление размытости образа	—	—	—	—
Base-in break / дивергентные ФР — разрушение фузии	7	3	5–9	4
Base-in recovery / дивергентные ФР — восстановление фузии	4	2	3–5	2.5
Base-out blur / конвергентные ФР — появление размытости образа	9	4	7–11	5
Base-out break / конвергентные ФР — разрушение фузии	19	8	15–23	11
Base-out recovery / конвергентные ФР — восстановление фузии	10	4	8–12	6
для близи				
Base-in blur / дивергентные ФР — появление размытости образа	13	4	11–15	7.5
Base-in break / дивергентные ФР — разрушение фузии	21	4	19–23	12
Base-in recovery / дивергентные ФР — восстановление фузии	13	5	10–16	7.5
Base-out blur / конвергентные ФР — появление размытости образа	17	5	14–20	10
Base-out break / конвергентные ФР — разрушение фузии	21	6	18–24	12
Base-out recovery / конвергентные ФР — восстановление фузии	11	7	7–15	6.5

Таблица 3. Нормативные значения конвергентных и дивергентных ФР (КФР и ДФР) по критерию срыва фузии (распада единого образа на два) для офтальмологически здоровых людей по данным разных авторов

Возраст, годы	Кашенко, 1966 синоптофорный метод – ТО для слияния (угл.град)		Кашенко, 1966 синоптофорный метод – ТО для стереоскопии (угл.град)		Хенкин, Зубарев, 1973 синоптофорный метод (призм.дптр)		Хенкин, Зубарев, 1973 призм.метод – ФР для дали (призм.дптр)		Гули-Заде, 1979 призм.метод – ФР для близи (призм.дптр)	
	КФР	ДФР	КФР	ДФР	КФР	ДФР	КФР	ДФР	КФР	ДФР
5–7	–	–	–	–	–	–	–	–	18	12
8–9	–	–	–	–	4.9	3.2	15.1	5.4	19	12
10–11	–	–	–	–	4.4	2.8	17.5	5.9	22	14
12–13	–	–	–	–	3.9	3.2	19.0	6.5	26	14
14–15	–	–	–	–	4.6	2.7	17.6	0.5	–	–
14–18	–	–	–	–	–	–	–	–	29	14
Взрослые	16.1	5.1	22.3	6.0	–	–	–	–	–	–

Организация проведения исследования соответствовала принципам биомедицинской этики, представленным в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях (Declaration of Helsinki, 2013). Участие в исследовании было добровольным. От совершеннолетних испытуемых было получено информированное согласие на проведение процедуры измерений. Родители (законные представители) несовершеннолетних были проинформированы о проводившемся исследовании и дали письменное согласие на участие в нем детей.

Перед измерением ФР у испытуемых оценивали показатели рефракции при помощи авторефрактометра, остроту монокулярного и бинокулярного зрения на близком (0.5 м) и дальнем (4.0 м) расстояниях наблюдения, способность к стереоскопическому восприятию по результатам тестирования случайно-точечными стереограммами (СТС). Испытуемые с аномалиями рефракции проходили тестирование в условиях оптимальной оптической коррекции.

Аппаратура, использованная в экспериментальных исследованиях

Измерение фузионных резервов на синоптофоре

В работе был применен синоптофор СИНФ-1. Для оценки ФР были использованы ТО двух типов.

– Входящий в стандартную комплектацию прибора традиционный ТО на слияние в виде сидящей кошки. Угловые размеры ТО составляли около 8°. Каждый слайд пары содержал монокулярное изображение с одним отсутствующим элементом фигуры: в левом кошка была с ушами, но без хвоста, в правом – с хвостом, но без ушей. Целостный образ кошки формировался при усло-

вии успешной фузии левого и правого монокулярных образов.

– Оригинальные слайды с СТС, содержащими закодированный диспаратностью стереообъект. Угловые размеры ТО составляли около 8°. Левое и правое изображения поодиночке не содержали никакой информации о форме ТО, и монокулярно оба слайда воспринимались одинаково как плоские поля из случайных точек. Форма стереообъекта в виде месяца была закодирована относительными сдвигами точек левого и правого изображений (диспаратностью), и только в результате сопоставления одного изображения с другим испытуемый с нормально функционирующими механизмами бинокулярного стереопсиса видел циклопический стереообъект – месяц, находящийся на иной глубине, чем фоновая плоскость.

Процедура измерений. Перед началом измерений определяли межзрачковое расстояние для глаз испытуемого при помощи линейки с миллиметровой шкалой и соответственно устанавливали оптические головки. Оптические каналы (головки) синоптофора устанавливали соответственно нулевому положению всех шкал.

Испытуемый размещался на стуле регулируемой высоты. При обследовании под ногами детей размещали специальную подставку для их опоры. Голову испытуемого фиксировали при помощи регулируемых по высоте подбородника и налобника.

Парные ТО вставляли в соответствующие касеты. После подтверждения испытуемым того, что он правильно воспринимает бинокулярный образ при исходном (нулевом) положении оптических каналов (одна кошка с хвостом и ушами либо месяц, выступающий из фона) начинали медленно сводить/разводить оптические головки

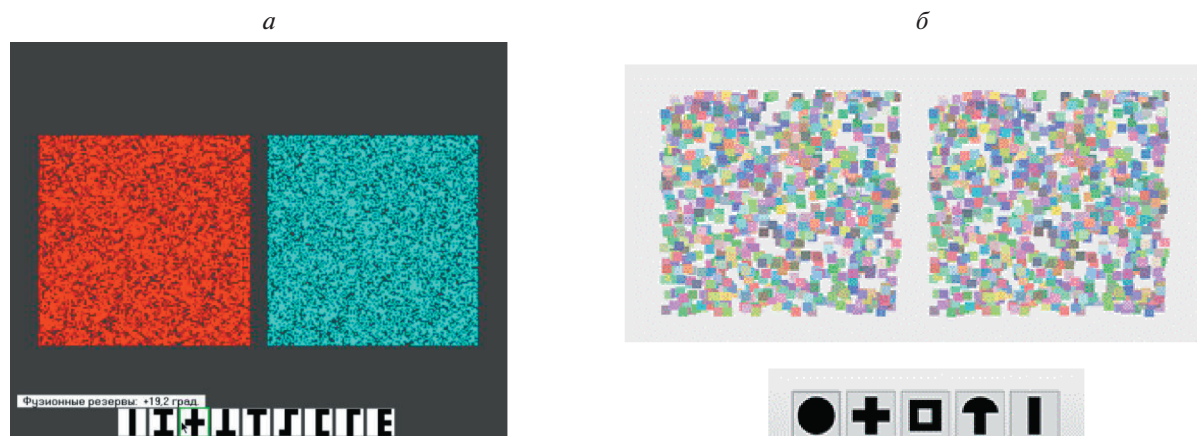


Рис. 2. Случайно-точечные стереограммы и контрольные стереообъекты-метки, используемые в программах “Фурор” — а и “Фузия” — б. Контрольные объекты видны только при успешной фузии левого и правого изображений.

синоптофора. После сообщения испытуемого о двоении кошки или исчезновении месяца с одновременным двоением фонового квадрата движение оптических головок прекращали и фиксировали значения углов их поворота по соответствующим шкалам. Углы конвергенции и дивергенции вычисляли путем сложения показаний левой и правой шкал прибора.

Правильность показаний испытуемых контролировали путем наблюдения за положением глазных яблок — в момент двоения ТО происходил возврат глазных яблок в положение, близкое к первоначальному, и наблюдалась серия поисковых движений глаз.

Измерение фузионных резервов на компьютеризированных установках

В разных сериях экспериментов были использованы разработанные в ИППИ РАН интерактивные компьютерные программы “Фурор” и “Фузия”. Программа “Фурор” была написана В.С. Токаревой, программа “Фузия” — А.С. Большаковым.

Характеристика интерактивных программ и стимулов. Программа “Фурор” рассчитана на применение анаглифного (цветового) метода сепарации левого и правого изображений. Программа была установлена на ноутбуке ASUS с размерами экрана 210×330 мм. Тестовыми стимулами служили СТС на поле 140×140 мм ($17 \times 17^\circ$), генерируемые на экране ноутбука и кодирующие простые стереообъекты, общим элементом которых была вертикальная полоса размером 114×26 мм (рис. 2, а). В процессе измерений стереообъекты менялись в случайном порядке. Размер отдельных “точек” — элементов СТС — составлял 4×4 пикселя, а размер пикселя был равен 0.25 мм. Скорость движения стимулов по экрану составляла

50 мм/мин. Подробное описание и результаты апробации данной программы отражены в публикации (Rozhkova, Vasilyeva, 2010).

Программа “Фузия” обеспечивает возможность раздельного предъявления зрительных стимулов левому и правому глазу на основе любого из двух методов сепарации: цветового или поляризационного (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610975). Для обеспечения возможности реализации второго метода использовали 3D монитор (LG Flatron D2342P-PN, диагональ 23”, ширина экрана 51 см) и 3D телевизор (LG 32LF620U, диагональ 32”, ширина экрана 71 см) с противоположной круговой поляризацией четных и нечетных строк. В качестве тестовых стимулов применялись СТС, которые имели размеры 90×90 мм ($10 \times 10^\circ$) и кодировали простые стереообъекты, слегка выступающие из фона за счет диспаратности при наблюдении через стереоочки (рис. 2, б). Размер отдельных “точек” — элементов СТС — составлял 5×5 пикселей, размер пикселя был равен 0.51 мм. Скорость движения стимулов по экрану можно было варьировать. В наших экспериментах она составляла 90 мм/мин.

Принцип работы программ основан на стандартных подходах к измерению ФР: движение стимулов по экрану от центра вызывает конвергентные/дивергентные движения глаз и приводит к рассогласованию аккомодации и конвергенции. С увеличением рассогласования фузия нарушается, бинокулярный образ начинает расплываться и бинокулярный ТО перестает восприниматься. Таким образом, в программах реализована возможность объективно контролировать субъективные показания испытуемых при измерении ФР без наблюдения за движениями глаз.

В разных сериях исследований экспериментальная установка включала ноутбук, 3D монитор, 3D телевизор, анаглифические и поляризационные очки, подставку-подбородник для фиксации головы испытуемого.

Процедура измерений. Измерения проводили на расстоянии 50 см от экрана в условиях дихоптического предъявления стимулов. При использовании анаглифического метода сепарации тестирование проводили в красно-зеленых очках, при использовании поляризационного метода — в поляризационных очках. Испытуемый располагался на стуле регулируемой высоты, его голову фиксировали на подставке-подбороднике таким образом, чтобы глаза находились на уровне центра экрана.

В начале измерений в центре экрана появлялась стереопара, при фузирании которой испытуемый видел ТО — квадрат со случайно-точечной текстурой и контрольный объект-метку, отделяющийся от фона. Затем испытуемого знакомили с полным набором меток, используемых в эксперименте. Когда испытуемый сообщал о своей готовности к измерениям, экспериментатор запускал программу медленного движения левого и правого стимулов в направлении от центра. При измерении конвергентных ФР правый стимул двигался влево, а левый — вправо, вызывая постепенное увеличение угла конвергенции. При измерении дивергентных ФР правый стимул двигался вправо, а левый — влево, что приводило к дивергенции зрительных осей.

По ходу движения циклопические стереообъекты-метки внутри тестовых стимулов менялись, это удерживало внимание испытуемого и позволяло точно установить момент распада бинокулярного образа. Регистрацию момента распада виртуального бинокулярного образа осуществляли щелчком мыши на основании субъективного отчета испытуемого, что приводило к остановке движения стимулов и выводу на экран полного набора контрольных объектов-меток. Испытуемому предлагалось выбрать объект-метку, воспринимаемый непосредственно перед моментом распада.

Испытуемому ставили задачу: как можно дольше удерживать состояние фузии, следя за сменой стереообъектов и констатируя момент потери фузии.

Оценкой ФР служили те предельные углы конвергенции и дивергенции, превышение которых вызывало срыв фузии, исчезновение циклопического объекта и диплопию.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение фузионных резервов, измеренных разными методами у испытуемых разного возраста

На рис. 3 и 4 приведены гистограммы распределения значений конвергентных и дивергент-

ных ФР, измеренных на синоптофоре для испытуемых разных возрастных групп. В двух колонках представлены данные, полученные на одних и тех же испытуемых с использованием двух принципиально различающихся тест-объектов — традиционного (ТО ТНС) и стереоскопического (ТО СТС). Всего при помощи данного метода было обследовано 304 школьника в возрасте от 7 до 17 лет.

Об общем характере возрастных изменений конвергентных ФР можно судить по суммарным гистограммам, полученным для групп детей 7—8 лет, 9—10 лет, 11—12 лет, 13—14 лет и 15—17 лет. Наряду с отсутствием выраженной и однозначной возрастной динамики хорошо заметно устойчивое различие гистограмм для стимулов двух типов по форме. Форма гистограмм для ТО СТС соответствует нормальному распределению. Гистограммы, полученные для ТО ТНС, сложные, двумодальные, указывают на неоднородность возрастных групп по ФР.

Гистограммы для дивергентных ФР, измеренных с использованием двух ТО, согласуются между собой. Теоретически, при разведении зрительных осей от состояния параллельности воспринимаемый бинокулярный образ должен распасться на два монокулярных, так как построение правдоподобного бинокулярного образа невозможно. Однако в действительности бинокулярный образ обычно еще сохраняется и при разведенных осях в пределах небольших углов отклонения от параллельности. С функциональной точки зрения это можно объяснить тем, что в определенных условиях при формировании видимого образа сенсорные механизмы фузии могут работать, игнорируя сигналы о позиции осей глаз. Таким образом, измеряемые на синоптофоре дивергентные ФР отражают только функционирование сенсорных механизмов фузии.

Хорошо известно, что ФР зависят от возраста, условий исследования, параметров ТО (размеров, вертикальной или горизонтальной ориентации, скорости движения стимулов), правильного понимания субъективных зрительных ощущений и скорости реакции при формулировании ответов испытуемым (Sassonov et al., 2010; Fray, 2013). Некоторые авторы также отмечают плохую воспроизводимость показателей как положительных, так и отрицательных ФР при повторных измерениях.

В процессе измерения ФР важно как можно точнее установить момент распада бинокулярного образа. В ходе медленного сдвига изображений и соответствующего поворота зрительных осей процесс распада единого бинокулярного образа на два монокулярных у разных людей может протекать по-разному, длиться различное время и сопровождаться колебаниями от частичной раздво-

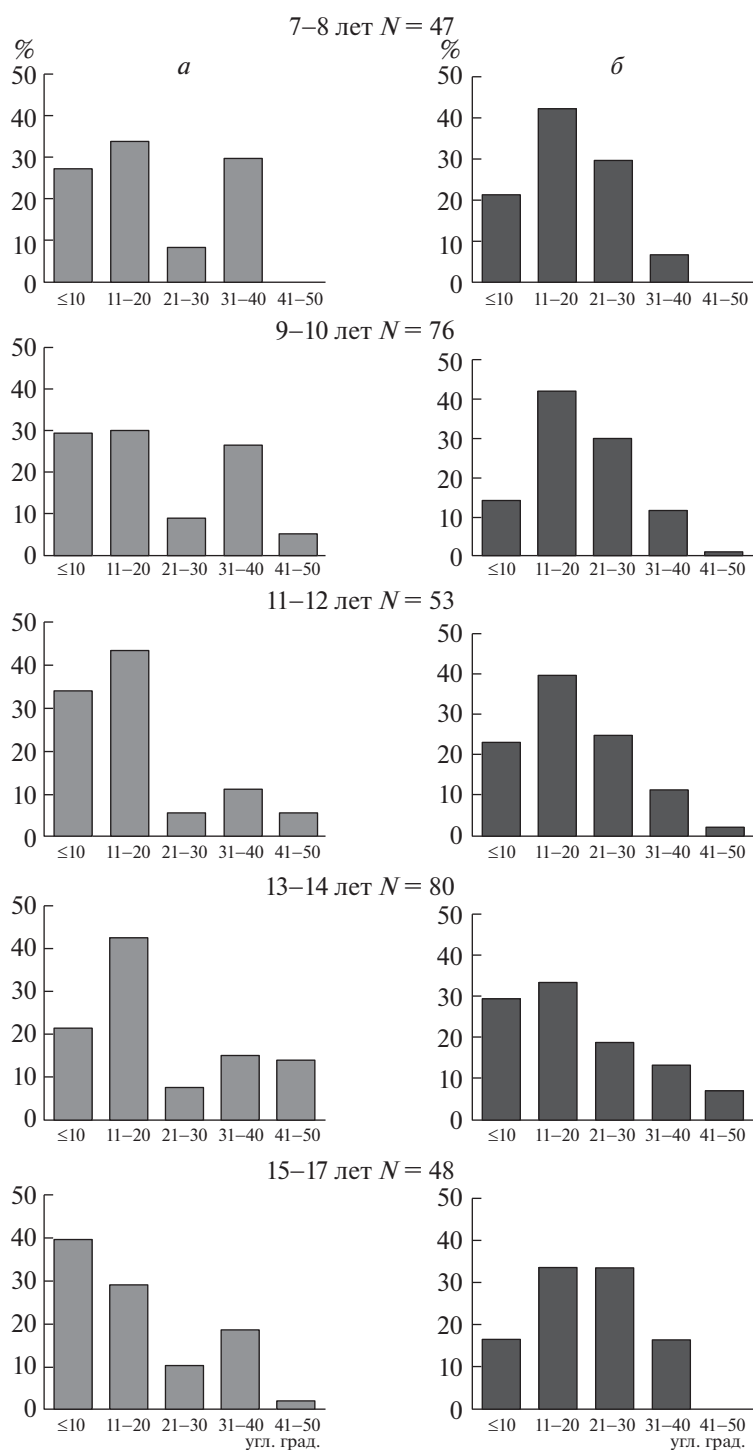


Рис. 3. Гистограммы распределения значений конвергентных ФР у детей и подростков разного возраста, полученные при измерении на синоптофоре: *a* — данные для ТО ТНС; *б* — данные для ТО СТС.

енности к обратному сливанию, потерей резкости изображения, искажением формы ТО.

Значительную степень неопределенности ТО ТНС допускают в установлении момента достижения критического угла конвергенции или дивергенции, при котором единый видимый об-

раз раздваивается, так как испытуемый может использовать разные критерии появления двоения — от слегка заметного расхождения ТО до полного разделения двух образов. Так, одни испытуемые отмечают этот момент как незначительное смещение ушей и хвоста объекта “кошка”, другие —

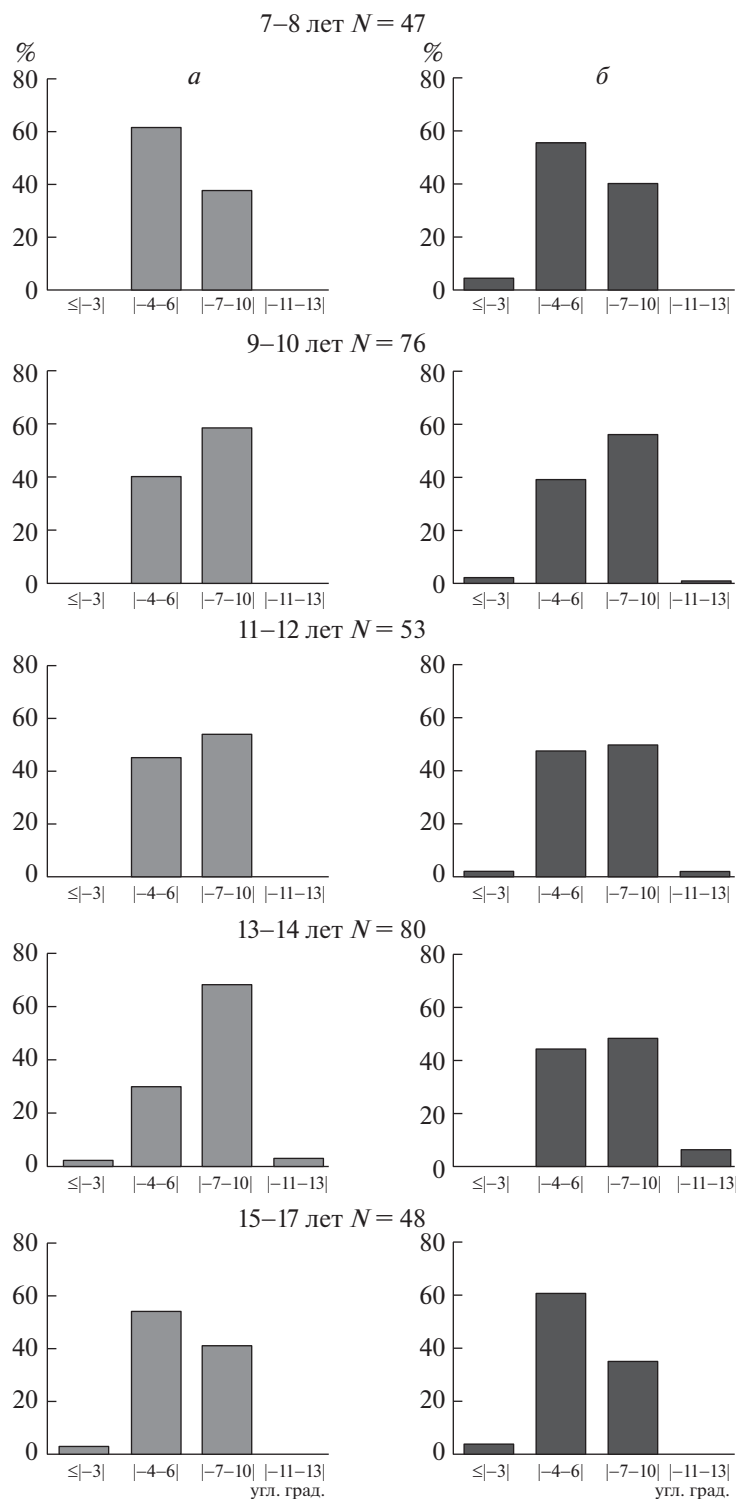


Рис. 4. Гистограммы распределения значений дивергентных ФР у детей и подростков разного возраста, полученные при измерении на синоптофоре: а – данные для ТО ТНС; б – данные для ТО СТС.

как полный распад фигуры на два образа, что выражается в недооценке или переоценке величины ФР. При работе с СТС такая неопределенность полностью исключена. Обработка СТС

осуществляется в чисто бинокулярной зрительной подсистеме, испытуемый может видеть стереобъект только за счет действия механизмов бинокулярной фузии. Монокулярные механизмы

Таблица 4. Процентное соотношение числа испытуемых, у которых индивидуальные значения ФР, измеренные на синоптофоре при помощи двух типов ТО, равны или различаются

Возраст и число испытуемых	Конвергентные ФР			Дивергентные ФР		
	ТНС = СТС, %	ТНС > СТС, %	ТНС < СТС, %	ТНС = СТС, %	ТНС > СТС, %	ТНС < СТС, %
7–8 лет ($N = 47$)	15.0	51.0	34.0	36.0	30.0	34.0
9–10 лет ($N = 76$)	18.4	39.5	42.1	56.6	23.7	19.7
11–12 лет ($N = 53$)	24.5	34.0	41.5	47.2	32.0	20.8
13–14 лет ($N = 77$)	20.8	48.0	31.2	40.3	38.9	20.8
15–17 лет ($N = 48$)	25.0	33.3	41.7	35.3	48.0	16.7

Таблица 5. Данные о процентных соотношениях испытуемых с разными значениями разности в результатах измерения ФР на синоптофоре при помощи двух типов ТО

Возраст и число испытуемых	Разница между двумя индивидуальными значениями							
	Конвергентные ФР					Дивергентные ФР		
	[0–2°]	[3–5°]	[6–10°]	[11–15°]	≥16°]	[0–2°]	[3–4°]	[5–6°]
7–8 лет ($N = 47$)	29.8	17.1	21.2	12.8	19.1	95.8	4.2	—
9–10 лет ($N = 76$)	26.3	13.2	32.9	6.6	21.0	84.3	10.5	5.2
11–12 лет ($N = 53$)	32.1	24.5	17.0	15.1	11.3	83.0	11.3	5.7
13–14 лет ($N = 77$)	35.0	10.4	26.0	9.1	19.5	71.4	24.7	3.9
15–17 лет ($N = 48$)	25.0	20.8	25.0	12.5	16.7	81.2	12.5	6.3

позволяют испытуемому видеть лишь случайно-точечный паттерн. Это дает возможность испытуемому точнее констатировать момент срыва фиксации.

Фактором, оказывающим влияние на результаты измерения ФР, также является скорость сведения/разведения оптических головок синоптофора, задаваемая исследователем. Она не всегда может быть оптимальной для времени реакции испытуемого, что неизбежно сказывается на результатах оценки и проявляется в значительной вариабельности данных и различных систематических отклонениях реальных гистограмм для ТО ТНС от искомой кривой распределения.

Так как при измерении ФР на синоптофоре с использованием двух принципиально различающихся ТО были получены разные результаты, необходимо проанализировать, как в разных возрастных группах и в целом в обследованной выборке испытуемых соотносятся эти показатели. В табл. 4 представлены данные о процентном соотношении числа испытуемых, у которых индивидуальные значения ФР, измеренные на синоптофоре при помощи двух типов ТО, равны или различаются.

Как видно из табл. 4, в разных возрастных группах доля испытуемых с одинаковыми оценками конвергентных ФР, измеренных при помощи ТО ТНС и ТО СТС, находится в диапазоне от 15 до 25%. С возрастом количество таких случаев

увеличивается, что вполне естественно и может быть связано с процессами созревания механизмов регуляции и контроля произвольной деятельности, обеспечивающих более четкий ответ при установке момента пропадания бинокулярного образа. В отношении оценок дивергентных ФР можно заключить, что число случаев с одинаковыми показателями максимально в возрастной группе 9–10 лет и составляет более 50%. В остальных группах таких случаев меньше, однако их доля не ниже 35%.

В связи с тем, что в каждой возрастной группе число испытуемых с различающимися оценками конвергентных и дивергентных ФР в условиях предъявления двух типов ТО было значительным, проанализируем разницу в показателях. В табл. 5 приведены данные о процентных соотношениях испытуемых с разными значениями разности в результатах измерения ФР на синоптофоре при помощи двух типов ТО.

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что разница в индивидуальных показателях ФР могла достигать 16° и более для конвергентных ФР и 5° и более — для дивергентных ФР.

Индивидуальные значения ФР, измеренные при помощи одного метода, но с применением принципиально различающихся ТО, могут существенно различаться даже у испытуемых старших возрастных групп.

Таблица 6. Медианы конвергентных (КФР) и дивергентных (ДФР) фузионных резервов, измеренных при помощи разных методов. Для синоптофора в скобках указаны типы тестовых объектов: традиционные – ТО ТНС и стереоскопические – ТО СТС. Для компьютерных методов в скобках указано название использованной компьютерной программы (“Фурор” или “Фузия”) и метод сепарации

Возраст, годы	Метод измерения							
	Синоптофор				Компьютерный метод, анаглифическая сепарация		Компьютерный метод, поляризационная сепарация	
	КФР (ТО ТНС)	ДФР (ТО ТНС)	КФР (ТО СТС)	ДФР (ТО СТС)	КФР (“Фурор”)	ДФР (“Фурор”)	КФР (“Фузия”)	ДФР (“Фузия”)
7–8	+15°	–6°	+17°	–6°	+14°	–6.5°	+25.9°	–8.6°
9–10	+18°	–7°	+20°	–7°	+15.9°	–7.6°	+25.8°	–10.7°
11–12	+14°	–7°	+20°	–6.5°	+17.8°	–8.2°	+39.9°	–9.9°
13–14	+16°	–7°	+16°	–7°	+18.2°	–8.6°	+30.7°	–9.9°
15–17	+14°	–6°	+20°	–6°	+16.8°	–8.4°	+29.5°	–9.4°

Оценка ФР, проведенная на компьютерных установках, показала, что в целом результаты согласуются с данными, полученными на синоптофоре, отражая процессы гетерохронного созревания исследованных механизмов, достижения состояния зрелости и снижения их пластичности в процессе возрастного развития и адаптации зрительной системы к средовым факторам. В то же время, как внутри возрастных групп, так и у одних и тех же испытуемых, ФР, измеренные на синоптофоре и на компьютерных установках, могут существенно различаться. Совокупность всех полученных результатов отражена в табл. 6. Так как распределение показателей ФР в возрастных группах не всегда можно было отнести к нормальному, в таблице приведены значения медиан.

Полученные данные указывают не только на внутригрупповые и индивидуальные различия в оценке ФР разными методами, но и на различия в показателях, полученных на компьютеризированных установках с использованием двух методов сепарации изображений – анаглифного и поляризационного.

Влияние метода сепарации изображений на результаты измерения фузионных резервов

В диагностике и лечении нарушений бинокулярного зрения часто используют цветовой метод сепарации левого и правого изображений. Очевидно, что различие фузируемых изображений по цвету может затруднять их слияние, провоцировать преждевременный срыв фузии и вызывать бинокулярную конкуренцию, приводя к неправильной оценке измеряемых показателей или снижению эффективности лечебных процедур.

Ранее проведенные опыты на синоптофоре с использованием специально изготовленных зеленых и красных ТО, имеющих разную степень

насыщенности, указывали на негативное влияние сильного различия левого и правого стимулов по цвету на результаты измерений ФР (Рожкова и др., 1996). Также было установлено, что ненасыщенные цветные ТО дают результаты, значительно превышающие результаты, полученные на насыщенных.

Задача следующего этапа исследования состояла в сравнении результатов оценки ФР в условиях использования цветового и поляризационного методов сепарации левого и правого изображений. В данной серии исследований приняли участие 50 человек в возрасте от 18 до 39 лет. Измерение ФР осуществляли при помощи интерактивной компьютерной программы “Фузия”. При реализации обоих методов сепарации использовали один и тот же 3D монитор. Тестовыми стимулами служили СТС одинаковой структуры для обоих методов сепарации. В одном режиме ТО, предназначенные для левого и правого глаза, имели разные цвета, в другом режиме – разные направления круговой поляризации света. По окончании серии экспериментов испытуемых просили дать субъективные оценки комфортности измерительных процедур при каждом из использованных методов сепарации изображений в 10-балльной шкале.

Анализ совокупности всех полученных данных выявил у большинства испытуемых существенную зависимость ФР от метода сепарации изображений. При оценке конвергентных ФР пик распределения значений, полученных в условиях цветовой и поляризационной сепарации, приходился на интервалы 15–20° и 30–35° соответственно (рис. 5), а при измерении дивергентных ФР – на интервалы |–2–4°| и |–10–12°| соответственно (рис. 6).

На рис. 7 представлены индивидуальные соотношения значений ФР, полученных в разных условиях сепарации. В 25% случаев для конвер-

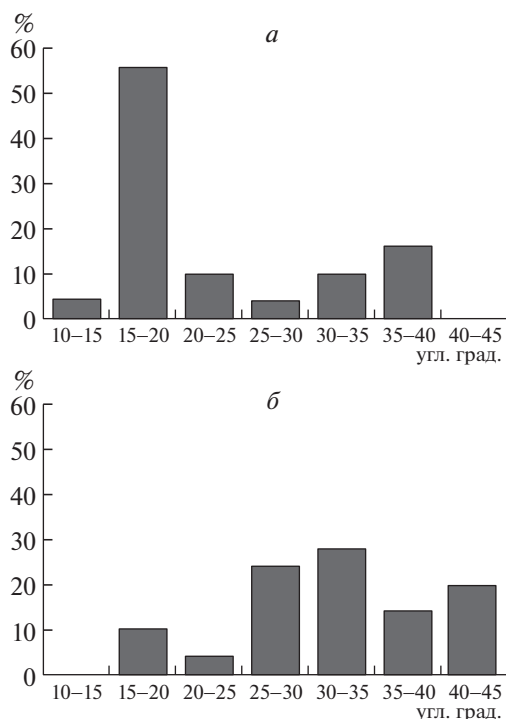


Рис. 5. Гистограммы значений конвергентных ФР, полученных в условиях цветовой — *а* и поляризационной — *б* сепарации.

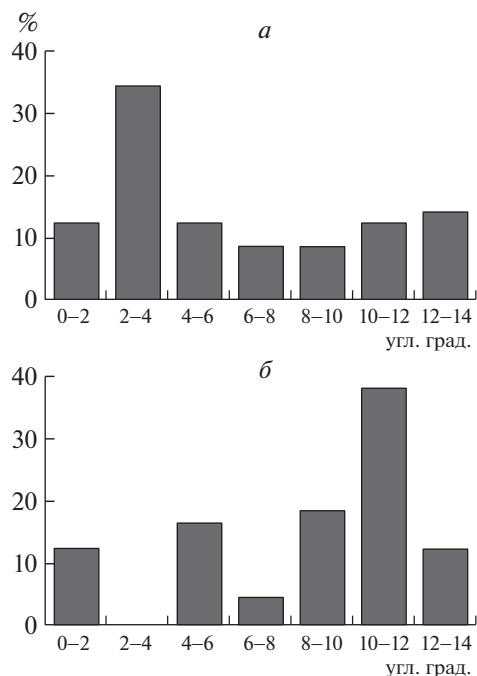


Рис. 6. Гистограммы значений дивергентных ФР, полученных в условиях цветовой — *а* и поляризационной — *б* сепарации.

гентных ФР и 38% случаев для дивергентных в условиях двух методов сепарации были получены близкие результаты — разница составляла не более 2° . На рис. 7 синие прямые линии соответствует равенству показателей в условиях обоих методов. Примерно в 60% случаев для конвергентных ФР и 30% случаев для дивергентных ФР значения, полученные в условиях поляризационной сепарации, были больше в 1.5–2 раза, чем в условиях цветовой. Также следует отметить, что в процессе анализа данных было установлено, что у одного испытуемого значения конвергентных ре-

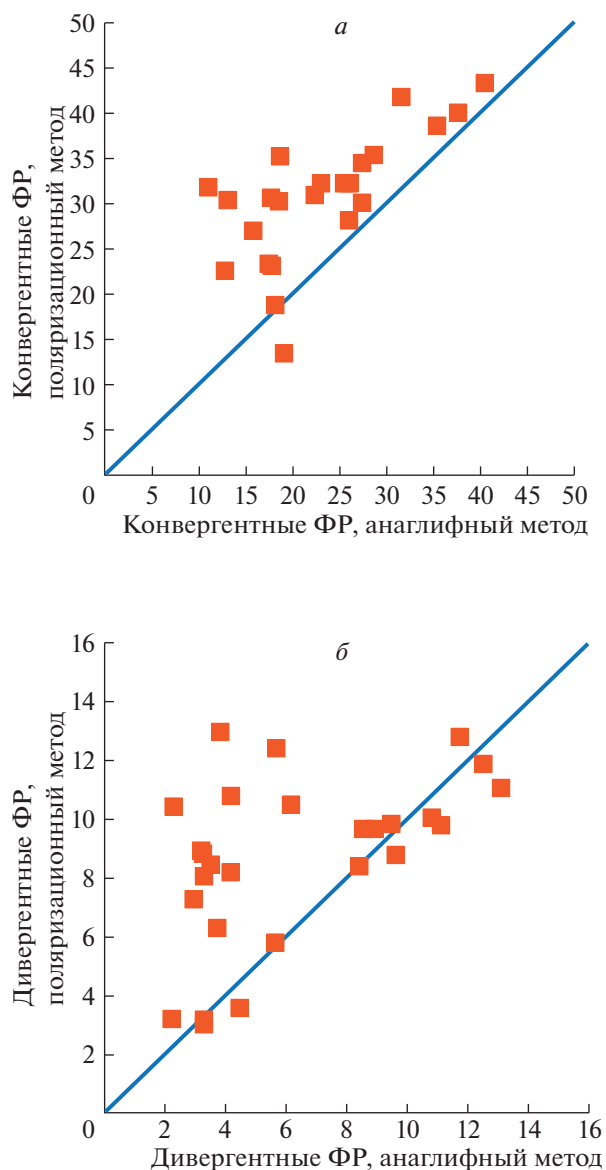


Рис. 7. Индивидуальные соотношения значений конвергентных — *а* и дивергентных — *б* ФР, полученных в условиях поляризационного и цветowego (анаглифного) методов сепарации. Синие линии соответствуют равенству значений ФР, измеренных при использовании обоих указанных методов сепарации.

зервов и у четверых испытуемых значения дивергентных в условиях цветовой сепарации были несколько выше, чем при поляризационной.

Анализ субъективных оценок комфортности процедур в условиях поляризационного и цветового методов показывает, что в среднем поляризационный метод сепарации получил больше баллов: 9.2 против 7.1 балла. При этом 30% респондентов поставили примерно одинаковые оценки за комфортность обоих методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

— Полученный нами экспериментальный материал позволяет сделать заключение о значительной вариабельности и гетерогенности результатов оценки ФР у детей и взрослых, полученных с использованием разных методов измерения. Данное обстоятельство связано как со сложной гетерархической организацией бинокулярной зрительной системы человека и существованием нескольких автономных систем переработки изображений, так и с влиянием условий и параметров процедуры на результаты измерений ФР. Для измерений на синоптофоре характерны низкая контролируемость оценки и высокая зависимость получаемых данных от субъективных критериев нарушения фузии, применяемых испытуемыми. Использование компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения дает возможность стандартизировать процедуру измерений и контролировать “честность” ответов испытуемых, что повышает точность и объективность измерений.

— Исследование ФР при помощи синоптофорного метода у испытуемых разного возраста с использованием двух принципиально различающихся тест-объектов — традиционного на слияние (ТНС) и стереоскопического (СТС) показало, что применение СТС в качестве тестовых стимулов позволяет рассчитывать на получение достаточно хорошо воспроизводимых данных о состоянии ФР.

— При использовании компьютерного метода получаемые значения ФР зависят от того, какой способ сепарации применяется — цветовой/англифный или поляризационный. Различие по цвету может возбуждать механизм бинокулярной конкуренции и быть фактором, затрудняющим объединение информации от двух глаз в зрительных отделах мозга, существенно влияя на результаты диагностических процедур. При одинаковых условиях измерений, но различных способах сепарации, в среднем, более высокие показатели ФР регистрируются при применении поляризационного метода, хотя у некоторых испытуемых оба способа дают одинаковые значения ФР.

— Проведенные исследования показали, что не может быть единого метода оценки ФР на все случаи жизни. В одних случаях требуется стандартный достаточно простой метод, дающий стабильно повторяемые результаты у разных исследователей. В других — необходимы методы, позволяющие измерять ФР в разных условиях и оценивать пределы фузионных способностей. При выборе метода оценки необходимо учитывать условия, в которых осуществляются зрительная работа (выполнение зрительных задач на начальном этапе обучения, работа за компьютером, дистанционное управление, профессиональный отбор для автовождения, пилотирования воздушных и космических аппаратов) и потенциальный запрос (скрининговый осмотр, комплексное изучение, динамическое наблюдение в ходе коррекционной работы).

Авторы выражают благодарность Е. Н. Крутцовой за техническую помощь при подготовке рисунков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балабаева Е.А., Матросова Ю.В. Сравнительный анализ фузионных резервов у детей со слабой и средней степенью миопии на фоне очковой и ортокератологической коррекции. *Медицина*. 2020. (1). С. 12–19.
<https://doi.org/10.29234/2308-9113-2020-8-1-12-19>
- Большаков А.С., Рожкова Г.И. *Интерактивная тестовая программа для оценки состояния и тренировки фузионных механизмов бинокулярного зрения ФУЗИЯ*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610975 от 09.01.2013.
- Васильева Н.Н. Комплексный анализ функциональных показателей бинокулярной зрительной системы у школьников. *Сенсорные системы*. 2021. Т. 35 (3). С. 199–216.
<https://doi.org/10.31857/S0235009221030069>
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И. Возрастная динамика фузионных резервов, измеренных при помощи циклопических тест-объектов с маркерами. *Сенсорные системы*. 2009. Т. 23 (1). С. 40–50.
- Гули-Заде А.А. *Состояние фузионных резервов у детей в зависимости от возраста, характера рефракции и степени аметропии, пути их нормализации*. Автореф. дисс. канд. мед. наук. Одесса. 1979. 25 с.
- Евсеева А.А., Кузнецов С.Л. Методы изучения качества жизни у офтальмологических больных. *Практическая медицина*. 2012. Т. 4–2 (59). С. 224–228.
- Ефимова Е.Л., Сомов Е.Е. Современный способ лечения амблиопии вторичного генеза и его эффективность. *Офтальмологические ведомости*. 2010. Т. 3 (3). С. 10–13.
- Кашура О.И., Егоров В.В., Смолякова Г.П. Эффективность функциональной реабилитации зрительных расстройств у школьников младших классов. *Российская педиатрическая офтальмология*. 2012. (1). С. 22–25.

- Кашенко Т.П. *Нарушения и методы восстановления фузионной способности зрительного анализатора при содружественном косоглазии*. Дисс. канд. мед. наук. М., 1966. 166 с.
- Клокова О.А., Сахнов С.Н., Шелихова О.А., Гейденрих М.С. Некоторые аспекты состояния аккомодационной функции и бинокулярного зрения у взрослых пациентов с гиперметропией, сложным гиперметропическим и смешанным астигматизмом. *Офтальмология*. 2019. Т. 16 (3). С. 344–349. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-3-344-349>
- Кононова Н.Е., Сомов Е.Е. Фузионные возможности здоровых детей различного возраста и страдающих содружественным косоглазием. *Невские горизонты—2018. Материалы научной конференции офтальмологов Невские горизонты*. СПб. Политехника-сервис, 2018. С. 152–162.
- Корнюшина Т.А. Методы реабилитации лиц с функциональными расстройствами зрения. *Вестник офтальмологии*. 2019. (3). С. 31–36. <https://doi.org/10.17116/ofalma201913503131>
- Корнюшина Т.А. Особенности изменения аккомодации у детей с различными видами рефракции под воздействием зрительных нагрузок. *Российская детская офтальмология*. 2014. (2). С. 26–33.
- Овечкин И.Г., Беликова Е.И., Кожухов А.А., Пожарицкий М.Д., Юдин В.Е., Будко А.А., Шакула А.В. Современные методические подходы к коррекции астигматизма у пациентов зрительно-напряженного труда. *Офтальмология*. 2019. Т. 16 (1). С. 88–94. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-1-88-94>
- Овечкин И.Г., Малышев А.В., Карапетов Г.Ю., Семькин В.Д., Депутатова А.Н., Балаян А.С. Методы оценки качества жизни пациента в офтальмологической практике. *Современная оптометрия*. 2015. 7 (87). С. 34–39.
- Рожкова Г.И., Подугольников Т.А., Сисенгалиева Г.Ж. Компьютерное тестирование бинокулярной зрительной системы человека. II. Прямая оценка основных клинических показателей. *Сенсорные системы*. 1996. Т. 10 (1). С. 59–68.
- Рожкова Г.И., Подугольников Т.А., Токарева В.С., Воронцов Д.Д., Голубков М.Г., Дрыгин С.В. *Интегрированный лечебно-диагностический комплекс программ “АКАДЕМИК”*. 1996. Сертификат соответствия “РОСС RU. СП07.Н00035”.
- Сергиенко Н.М. *Офтальмологическая оптика*. М.: Медицина, 1991. 144 с.
- Сомов Е.Е. *Зрительные возможности детей различного возраста и способы их оценки*. СПб. Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, 2014. 32 с.
- Сомов Е.Е. *Методы офтальмоэргономики*. Л.: Наука, 1989. 157 с.
- Тарутта Е.П., Аклаева Н.А., Тарасова Н.А., Ларина Т.Ю. Влияние офтальмоиотренажера-релаксатора “Визотроник” на фузионные резервы. *Российский общенациональный офтальмологический форум*. Под ред. В.В. Нероева. М.: Апрель, 2018. Т. 1. С. 234–236.
- Федеральные клинические рекомендации “Диагностика и лечение содружественного косоглазия”. *Российская педиатрическая офтальмология*. 2015. (2). С. 56–63.
- Хенкин В.А., Зубарев С.Ф. Состояние фузионных резервов у детей. *Возрастные особенности органа зрения в норме и патологии*. 1973. С. 37–40.
- Ajrezo L., Wiener-Vacher S., Bucci M., Bui-Quoc E. Influence of screen exposure on vergence components from childhood to adolescence. *Int J Ophthalmol Eye Sci*. 2016. V. 4 (1). P. 170–177. <https://doi.org/10.19070/2332-290X-1600036>
- Alrasheed S.H. Clinical characteristics of patients presenting with headache at binocular vision clinic: a hospital based study. *Pakistan Journal of Ophthalmology*. 2020a. V. 36 (3). P. 247–252. <https://doi.org/10.36351/pjov36i3.1046>
- Alrasheed S.H. Effect of binocular vision problems on childhood academic performance and teachers' perspective. *Pakistan Journal of Ophthalmology*. 2020b. V. 36 (2). P. 162–167. <https://doi.org/10.36351/pjov36i2.896>
- American Optometric Association. Evidence-based clinical practice guideline: comprehensive pediatric eye and vision examination. *Optometric clinical practice*. 2020. V. 2 (2). <https://doi.org/10.37685/uiwlibraries.2575-7717.2.2.1007>
- Anderson H., Stuebing K.K., Fern K.D., Manny R.E. Ten-year changes in fusional vergence, phoria, and near-point of convergence in myopic children. *Optom Vis Sci*. 2011. V. 88 (9). P. 1060–1065. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e31822171c0>
- Antona B., Barrio A., Barra F., Gonzalez E., Sanchez I. Repeatability and agreement in the measurement of horizontal fusional vergences. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2008. V. 28 (5). P. 475–491. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2008.00583.x>
- Askarizadeh F., Heirani M., Khorrami-Nejad M., Khabazkhoob M., Narooie-Noori F. Effect of vergence facility testing on horizontal fusional reserves. *Optometry and Vision Science*. 2022. V. 99 (1). P. 51–57. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001825>
- Aziz S., Cleary M., Stewart H.K., Weir C.R. Are orthoptic exercises an effective treatment for convergence and fusion deficiencies? *Strabismus*. 2006. V. 14(4). P. 183–189. <https://doi.org/10.1080/09273970601026185>
- Conway M.L., Thomas J., Subramanian A. Is the aligning prism measured with the mallet unit correlated with fusional vergence reserves? *PLoS ONE*. 2012. V. 7 (8). e42832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042832>
- Cooper J.S., Burns C.R., Cotter S.A., Daum K.M., Griffin J.R., Scheiman M.M. Care for the patient with accommodative and vergence dysfunction. *Optometric clinical practice guideline*. U.S.A. Healthy Vision, 2000. 83 p.
- Elliott D.B. *Clinical procedures in primary eye care E-Book*. Elsevier Health Sciences. 2020.
- Fray K.J. Fusional amplitudes: exploring where fusion falters. *Am Orthopt J*. 2013. V. 63. P. 41–54. <https://doi.org/10.3368/aoj.63.1.41>
- Fray K.J. Fusional amplitudes: developing testing standards. *Strabismus*. 2017. V. 25 (3). P. 145–155. <https://doi.org/10.1080/09273972.2017.1349814>

- Fu T., Wang J., Levin M., Su Q., Li D., Li J. Fusional vergence detected by prism bar and synoptophore in Chinese childhood intermittent exotropia. *J. Ophthalmol.* 2015. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1155/2015/987048>
- Goss D.A., Becker E. Comparison of near fusional vergence ranges with rotary prisms and with prism bars. *Optometry.* 2011. V. 82 (2). P. 104–107.
<https://doi.org/10.1016/j.optm.2010.09.011>
- Jorge J., de Almeida J.B., Parafita M.A. Binocular vision changes in university students: a 3-year longitudinal study. *Optom Vis Sci.* 2008. V. 85 (10). P. 999–1006.
<https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3181890d35>
- Lança C.C., Rowe F.J. Measurement of fusional vergence: a systematic review. *Strabismus.* 2019. V. 27 (2). P. 88–113.
<https://doi.org/10.1080/09273972.2019.1583675>
- Lança C.C., Rowe F.J. Variability of fusion vergence measurements in heterophoria. *Strabismus.* 2016. V. 24 (2). P. 63–69.
<https://doi.org/10.3109/09273972.2016.1159234>
- Oganyan T.A., Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Assessment of fusional reserves by means of interactive software: the effect of stimulus velocity. *Perception.* 2009. V. 38 (Supplementary). P. 105.
- Piano M.E.F., O'Connor A.R. The effect of degrading binocular single vision on fine visuomotor skill task performance. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2013. V. 54 (13). P. 8204–8213.
<https://doi.org/10.1167/iovs.12-10934>
- Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N. A computer-aided method for the evaluation of fusional reserves with objective control of fusion break. *Human Physiology.* 2010. V. 36 (3). P. 364–366.
<https://doi.org/10.1134/S0362119710030187>
- Rucker J.C., Phillips P.H. Efferent vision therapy. *J. Neuro-Ophthalmology.* 2018. V. 38 (2). P. 230–236.
<https://doi.org/10.1097/WNO.0000000000000480>
- Sassonov O., Sassonov Y., Koslowe K., Shneur E. The effect of test sequence on measurement of positive and negative fusional vergence. *Optom Vis Dev.* 2010. V. 41. P. 24–27.
- Sreenivasan V., Babinsky E.E., Wu Y., Candy T.R. Objective measurement of fusional vergence ranges and heterophoria in infants and preschool children. *Investigative ophthalmology & visual science.* 2016. V. 57 (6). P. 2678–2688.
<https://doi.org/10.1167/iovs.15-17877>
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Age dynamics of fusion capabilities assessed by means of RDS with markers for objective control of binocular image splitting. *Perception.* 2008. V. 37 (Supplementary). P. 102.
- World Medical Association. declaration of helsinki ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA.* 2013. V. 310 (20). P. 2191–2194.
<https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

Dependence of the results of the assessment of fusion reserves on the measurement method, tools and parameters of test stimuli

N. N. Vasilyeva^{a, #}, G. I. Rozhkova^a, M. A. Gracheva^a, and A. S. Bolshakov^a

^a Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Russian Academy of Sciences, 127051 Moscow, B. Karetny per. 19, Build. 1, Russia

[#]E-mail: nn_vasilyeva@mail.ru

Measurement of fusional reserves (FR) is one of the main procedures used for assessing the conditions of binocular functions in patients, and for differential diagnostics of visual disorders. Nevertheless, among ophthalmologists and specialists in visual perception, there is still no consensus on the best method and procedure for measuring FR. The reasons of such situation could be complexity of interactions between sensory, accommodative and oculomotor mechanisms of vision during the measurement procedures, as well as dependence of the results obtained on methods and tools employed. Nevertheless, for correct interpretation and effective use of the FR estimates, it is necessary to clearly understand the essence of testing and the degree of influence of various factors on the measurement results. It is also important for improving the methods of the FR assessment and elaborating better diagnostic criteria. One of the ways to approach this goal is to compare the FR data obtained by different methods on the same participants. Some studies in this direction have been already conducted, but they are still insufficient for comprehensive conclusions. This article contains a comparative analysis of the results obtained employing traditional measurements of FR on the synoptophore and applying novel computerized methods. The advantages and disadvantages of various methods, the prospects for their improvement and standardization are discussed.

Key words: binocular vision, fusion reserves, accommodation, vergence, synoptophore, prism bar, computer methods of visual function assessment, stereopair separation techniques

REFERENCES

- Balabaeva E.A., Matrosova Yu.V. Sravnitel'nyi analiz fuzionnykh rezervov u detei so slaboi i srednei stepen'yu miopii na fone ochkovoi i ortokeratologicheskoi korektsii [The comparative analysis of fusion reserves in children with mild and average degree of myopia in association with spectacle and orthokeratological correction]. *Medicine.* 2020. (1). P. 12–19. (in Russian).
<https://doi.org/10.29234/2308-9113-2020-8-1-12-19>
- Bolshakov A.S., Rozhkova G.I. *Interaktivnaya testovaya programma dlya otsenki sostoyaniya i trenirovki fuzionnykh mekhanizmov binokulyarnogo zreniya FUZIYA* [Interactive computer program “FUZIYA” for assessment

- and training of binocular vision fusional reserves]. State registration certificate № 2013610975, 09.01.2013.
- Vasilyeva N.N. Kompleksnyi analiz funktsionalnykh pokazatelei binokulyarnoi zritel'noi sistemy u shkolnikov [Analysis of the functions of binocular visual systems in schoolchildren]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2021. V. 35 (3). P. 199–216 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0235009221030069>
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Vozrastnaya dinamika fuzionnykh rezervov, izmerennykh pri pomoshchi tsiklopesicheskikh test-ob"ektov s markerami [Age dynamics of fusional reserves assessed by means of cyclopean stimuli with markers]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2009. V. 23 (1). P. 40–50. (in Russian).
- Guli-Zade A.A. *Sostoyaniye fuzionnykh rezervov u detei v zavisimosti ot vozrasta, kharaktera refraktsii i stepeni ametropii, puti ikh normalizatsii* [The state of fusional reserves in children depending on age, refraction, and ametropia, and the ways of their normalization]. Abstract of the PhD thesis. Odessa. 1979. 25 p. (in Russian).
- Evshevs A.A., Kuznetsov S.L. Metody izucheniya kachestva zhizni u oftal'mologicheskikh bol'nykh [Methods of study of life quality in ophthalmological patients]. *Practical medicine*. 2012. V. 4–2 (59). P. 224–228. (in Russian).
- Efimova E.L., Somov E.E. Sovremennyyi sposob lecheniya ambliopii vtorichnogo geneza i ego ehffektivnost' [A modern method for secondary amblyopia treatment, and its efficacy]. *Ophthalmology Journal*. 2010. V. 3 (3). P. 10–13. (in Russian).
- Kashura O.I., Egorov V.V., Smolyakova G.P. Ehffektivnost' funktsional'noi reabilitatsii zritel'nykh rasstroistv u shkol'nikov mladshikh klassov [The efficacy of functional rehabilitation of visual disturbances in junior schoolchildren]. *Rossiiskaya Pediatricheskaya Oftal'mologiya* [Russian Pediatric Ophthalmology]. 2012. (1). P. 22–25 (in Russian).
- Kaschenko T.P. *Narusheniya i metody vosstanovleniya fuzionnoi sposobnosti zritel'nogo analizatora pri sodruzhestvennom kosoglazii* [Fusion ability of the visual analyzer in concomitant strabismus: impairments and methods of restoring]. PhD Thesis. Moscow, 1966. 166 p. (in Russian).
- Klokov O.A., Sakhnov S.N., Shelikhova O.A., Geydenrikh M.S. Nekotorye aspekty sostoyaniya akkomodatsionnoi funktsii i binokulyarnogo zreniya u vzroslykh patsientov s gipermetropiei, slozhnym gipermetropicheskim i smeshannym astigmatizmom [Some aspects of the accommodative function condition and binocular vision in adult patients with hypermetropia, with complex hypermetropic and mixed astigmatism]. *Ophthalmology in Russia*. 2019. V. 16 (3). P. 344–349. (in Russian). <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-3-344-349>
- Kononova N.E., Somov E.E. Fuzionnye vozmozhnosti zdorovykh detei razlichnogo vozrasta i stradayushchikh sodruzhestvennym kosoglaziem [Fusion capabilities of healthy children of different ages and those suffering from concomitant strabismus]. *Conference proceedings "Nevskie gorizonty–2018"*. Saint-Petersburg. 2018. P. 152–152. (in Russian).
- Kornyushina T.A. Metody reabilitatsii lits s funktsional'nymi rasstroistvami zreniya [Rehabilitation methods for individuals with functional vision disorders]. *The russian annals of ophthalmology*. 2019. (3). P. 31–36. (in Russian). <https://doi.org/10.17116/oftalma201913503131>
- Kornyushina T.A. Osobennosti izmeneniya akkomodatsii u detei s razlichnymi vidami refraktsii pod vozdeistviem zritel'nykh nagruzok [Features of accommodation changes in children with different types of refraction under effect of visual loads]. *Russian ophthalmology of children*. 2014. (2). P. 26–33. (in Russian).
- Ovechkin I.G., Belikova E.I., Kozhukhov A.A., Pozharitskii M.D., Yudin V.E., Budko A.A., Shakula A.V. Sovremennyye metodicheskie podkhody k korrektsii astenopii u patsientov zritel'no-napryazhennogo truda [Modern Methodological Approaches to the Correction of Asthenopia in Patients with Visual-Intensive Work]. *Ophthalmology in Russia*. 2019. V. 16 (1). P. 88–94. (in Russian). <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-1-88-94>
- Ovechkin I.G., Malyshev A.V., Karapetov G.YU., Semykin V.D., Deputatova A.N., Balayan A.S. Metody otsenki kachestva zhizni patsienta v oftal'mologicheskoi praktike [Methods for assessing the quality of life of a patient in ophthalmic practice]. *Sovremennaya optometriya*. 2015. 7 (87). P. 34–39. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Sisengalieva G.ZH. Komp'yuternoe testirovaniye binokulyarnoi zritel'noi sistemy cheloveka. II. Pryamaya otsenka osnovnykh klinicheskikh pokazatelei [Computer-based testing of human binocular vision system. II. Direct assessment of the main clinical indicators]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 1996. V. 10 (1). P. 59–68. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Tokareva V.S., Vorontsov D.D., Golubkov M.G., Drygin S.V. *Integrirovannyi lechebno-diagnosticskii kompleks programm "AKADEMIK"* [Integrated programs for diagnostics and treatment "AKADEMIK"]. 1996. State certificate "POCC RU. СП07.H00035".
- Sergienko N.M. *Oftal'mologicheskaya optika* [Ophthalmological optics]. Moscow. Meditsina, 1991. 144 p. (in Russian).
- Somov E.E. *Zritel'nye vozmozhnosti detei razlichnogo vozrasta i sposoby ikh otsenki* [Visual functions and methods for their assessment]. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi pediatricheskii meditsinskii universitet, 2014. 32 p. (in Russian).
- Somov E.E. *Metody oftal'moehrgonomiki* [Ophthalmological methods]. Leningrad. Nauka, 1989. 157 p. (in Russian).
- Tarutta E.P., Aklaeva N.A., Tarasova N.A., Larina T.YU. Vliyaniye oftal'momiotrenazhera-relaksatora "Vizotronik" na fuzionnye rezervy [Influence of the ophthalmological myotrainer and relaxer "Visotronic" on fusion reserves]. *Proceedings of the Rossiiskii obshchestvennyi oftal'mologicheskii forum*. Ed. V.V. Neroev. Moscow, April'. 2018. V. 1. P. 234–236. (in Russian).
- State clinical recommendations. Diagnostika i lechenie sodruzhestvennogo kosoglaziya [Diagnosis and treatment of concomitant strabismus]. *Rossiiskaya Pediatricheskaya Oftal'mologiya* [Russian Pediatric Ophthalmology]. 2015. (2). P. 56–63. (in Russian).

- Khenkin V.A., Zubarev S.F. Sostoyanie fuzionnykh rezervov u detei [State of fusion reserves in children]. *Vozrastnye osobennosti organa zreniya v norme i patologii*. 1973. P. 37–40. (in Russian).
- Ajrezo L., Wiener-Vacher S., Bucci M., Bui-Quoc E. Influence of screen exposure on vergence components from childhood to adolescence. *Int J Ophthalmol Eye Sci*. 2016. V. 4 (1). P. 170–177. <https://doi.org/10.19070/2332-290X-1600036>
- Alrasheed S.H. Clinical characteristics of patients presenting with headache at binocular vision clinic: a hospital based study. *Pakistan Journal of Ophthalmology*. 2020a. V. 36 (3). P. 247–252. <https://doi.org/10.36351/pjo.v36i3.1046> <https://doi.org/10.36351/pjo.v36i3.1046>
- Alrasheed S.H. Effect of binocular vision problems on childhood academic performance and teachers' perspective. *Pakistan Journal of Ophthalmology*. 2020b. V. 36 (2). P. 162–167. <https://doi.org/10.36351/pjo.v36i3.1046>
- American Optometric Association. Evidence-based clinical practice guideline: comprehensive pediatric eye and vision examination. *Optometric clinical practice*. 2020. V. 2 (2). <https://doi.org/10.37685/uiwlibraries.2575-7717.2.2.1007>
- Anderson H., Stuebing K.K., Fern K.D., Manny R.E. Ten-year changes in fusional vergence, phoria, and near-point of convergence in myopic children. *Optom Vis Sci*. 2011. V. 88 (9). P. 1060–1065. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e31822171c0>
- Antona B., Barrio A., Barra F., Gonzalez E., Sanchez I. Repeatability and agreement in the measurement of horizontal fusional vergences. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2008. V. 28 (5). P. 475–491. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2008.00583.x>
- Askarizadeh F., Heirani M., Khorrami-Nejad M., Khabazkhoob M., Narooie-Noori F. Effect of vergence facility testing on horizontal fusional reserves. *Optometry and Vision Science*. 2022. V. 99 (1). P. 51–57. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001825>
- Aziz S., Cleary M., Stewart H.K., Weir C.R. Are orthoptic exercises an effective treatment for convergence and fusion deficiencies? *Strabismus*. 2006. V. 14 (4). P. 183–189. <https://doi.org/10.1080/09273970601026185>
- Conway M.L., Thomas J., Subramanian A. Is the aligning prism measured with the mallett unit correlated with fusional vergence reserves? *PLoS ONE*. 2012. V. 7 (8). e42832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042832>
- Cooper J.S., Burns C.R., Cotter S.A., Daum K.M., Griffin J.R., Scheiman M.M. Care for the patient with accommodative and vergence dysfunction. *Optometric clinical practice guideline*. U.S.A. Healthy Vision, 2000. 83 p.
- Elliott D.B. *Clinical procedures in primary eye care E-Book*. Elsevier Health Sciences. 2020.
- Fray K.J. Fusional amplitudes: exploring where fusion falters. *Am Orthopt J*. 2013. V. 63. P. 41–54. <https://doi.org/10.3368/aoj.63.1.41>
- Fray K.J. Fusional amplitudes: developing testing standards. *Strabismus*. 2017. V. 25 (3). P. 145–155. <https://doi.org/10.1080/09273972.2017.1349814>
- Fu T., Wang J., Levin M., Su Q., Li D., Li J. Fusional vergence detected by prism bar and synoptophore in Chinese childhood intermittent exotropia. *J Ophthalmol*. 2015. P. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2015/987048>
- Goss D.A., Becker E. Comparison of near fusional vergence ranges with rotary prisms and with prism bars. *Optometry*. 2011. V. 82 (2). P. 104–107. <https://doi.org/10.1016/j.optm.2010.09.011>
- Jorge J., de Almeida J.B., Parafita M.A. Binocular vision changes in university students: a 3-year longitudinal study. *Optom Vis Sci*. 2008. V. 85 (10). P. 999–1006. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3181890d35>
- Lança C.C., Rowe F.J. Measurement of fusional vergence: a systematic review. *Strabismus*. 2019. V. 27 (2). P. 88–113. <https://doi.org/10.1080/09273972.2019.1583675>
- Lança C.C., Rowe F.J. Variability of fusion vergence measurements in heterophoria. *Strabismus*. 2016. V. 24 (2). P. 63–69. <https://doi.org/10.3109/09273972.2016.1159234>
- Oganyan T.A., Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Assessment of fusional reserves by means of interactive software: the effect of stimulus velocity. *Perception*. 2009. V. 38 (Supplementary). P. 105.
- Piano M.E.F., O'Connor A.R. The effect of degrading binocular single vision on fine visuomotor skill task performance. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2013. V. 54 (13). P. 8204–8213. <https://doi.org/10.1167/iovs.12-10934>
- Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N. A computer-aided method for the evaluation of fusional reserves with objective control of fusion break. *Human Physiology*. 2010. V. 36 (3). P. 364–366. <https://doi.org/10.1134/S0362119710030187>
- Rucker J.C., Phillips P.H. Efferent vision therapy. *Journal of Neuro-Ophthalmology*. 2018. V. 38 (2). P. 230–236. <https://doi.org/10.1097/WNO.0000000000000480>
- Sassonov O., Sassonov Y., Koslowe K., Shneur E. The effect of test sequence on measurement of positive and negative fusional vergence. *Optom Vis Dev*. 2010. V. 41. P. 24–27.
- Sreenivasan V., Babinsky E.E., Wu Y., Candy T.R. Objective measurement of fusional vergence ranges and heterophoria in infants and preschool children. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2016. V. 57 (6). P. 2678–2688. <https://doi.org/10.1167/iovs.15-17877>
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Age dynamics of fusion capabilities assessed by means of RDS with markers for objective control of binocular image splitting. *Perception*. 2008. V. 37 (Supplementary). P. 102.
- World Medical Association. declaration of helsinki ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*. 2013. V. 310 (20). P. 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

РЕГУЛЯРНОСТЬ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГАНГЛИОЗНЫХ КЛЕТОК В СЕТЧАТКЕ ДЕЛЬФИНА УВЕЛИЧИВАЕТСЯ В ПОСТНАТАЛЬНОМ ОНТОГЕНЕЗЕ

© 2022 г. А. М. Масс^{1,*}, А. Я. Супин¹

¹ Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
119071 Москва, Ленинский просп., 33, Россия

*E-mail: alla-mass@mail.ru

Поступила в редакцию 21.03.2022 г.

После доработки 02.04.2022 г.

Принята к публикации 28.04.2022 г.

Исследована регулярность расположения ганглиозных клеток в зонах высокого разрешения сетчатки новорожденного и взрослого бутылконосного дельфина *Tursiops truncatus*. В качестве критериев регулярности использованы два показателя: статистическое распределение расстояний от каждой клетки до ближайшей соседней клетки (nearest neighbor distance, NND-распределение) и плотность окружающих клеток вокруг каждой клетки, как функция расстояния (пространственная автокоррелограмма, ПАКГ). NND-распределения для клеток сетчатки как новорожденного, так и для взрослого животного отличались от распределения для случайного массива точек, что рассматривается как указание на регулярность расположения клеток. Распределения для новорожденного и для взрослого животного были сходными. ПАКГ для сетчаток как новорожденного, так и взрослого животного отличались от автокоррелограммы для случайного массива точек наличием вокруг каждой из клеток зоны, в которой другие клетки были редки или отсутствовали. Этим они отличались от ПАКГ случайного массива точек, что также расценивается как указание на регулярность расположения клеток. У взрослого животного радиус зоны, свободной от соседних клеток, был шире, чем у новорожденного, что расценивается как показатель большей регулярности расположения клеток у взрослого животного по сравнению с новорожденным. Отсутствие различий NND-распределений у новорожденного и взрослого животного объясняется меньшей информативностью этого показателя по сравнению с ПАКГ. Предполагается, что формирование пространственной организации сетчатки у дельфина не заканчивается к моменту рождения, но продолжается в процессе постнатального онтогенеза. Это формирование состоит в продолжающемся упорядочении взаимного расположения ганглиозных клеток.

Ключевые слова: дельфин, сетчатка, ганглиозные клетки, расстояние до ближайшего соседа, пространственная автокоррелограмма

DOI: 10.31857/S0235009222030052

ВВЕДЕНИЕ

Китообразные, в том числе дельфины, характеризуются своеобразной организацией сетчатки глаза и, соответственно, поля зрения. У наземных млекопитающих в сетчатке имеется одна зона высокой концентрации ганглиозных клеток в виде пятна *area centralis* или назотемпорально вытянутой полоски *visual streak* (Hughes, 1977). Эта зона сетчатки обслуживает центральную зону поля зрения, в которой острота зрения максимальна. У дельфинов и других китообразных сетчатка имеет две зоны высокой концентрации ганглиозных клеток: в темпоральном и назальном секторах. Соответственно в поле зрения создается две зоны высокого разрешения: во фронтальном секторе

(обслуживается темпоральной зоной концентрации ганглиозных клеток) и в темпоральном секторе (обслуживается назальной зоной) (Mass, Supin, 2007). Соответственно такой организации сетчатки перестроена и оптическая система глаза, которая обеспечивает фокусировку изображений на зонах сетчатки с высокой концентрацией ганглиозных клеток. Зрачок у них имеет U-образную форму и при сокращении превращается в две узкие апертуры, через которые свет попадает на темпоральную и назальную зоны высокого разрешения сетчатки. Сферический (не чечевицеобразный, как у наземных млекопитающих) хрусталик обеспечивает фокусировку изображения без участия светопреломления на поверхности рого-

вицы (в воде светопреломление на роговице незначительно из-за близких значений коэффициентов светопреломления у сред перед и за поверхностью), но и имеет одинаковые фокусные расстояния для световых лучей, приходящих с разных направлений (Mass, Supin, 2007).

Для понимания основных закономерностей формирования зрительной системы важно установить, в какой последовательности формируются особенности зрительной системы китообразных. Эта задача может быть решена исследованием онтогенетического материала. Ранее проведенное сравнительное исследование организации сетчатки глаза у новорожденного и у взрослого бутылконосого дельфина *Tursiops truncatus* (Mass, Supin, 2020) показало, что характерные особенности организации сетчатки сформированы уже к моменту рождения: сетчатка имеет две области повышенной концентрации ганглиозных клеток, причем плотность клеток (количество клеток на единицу площади) в этих областях не меньше, чем у взрослых особей или даже немного больше за счет меньшей площади сетчатки у новорожденного. Означает ли этот результат, что ретиальное разрешение и зависящая от него острота зрения у новорожденного дельфина полностью сформированы и не отличаются от таковых взрослого дельфина?

Ответ на этот вопрос в значительной степени зависит от критерия оценки ретиального разрешения. Очевидно, что это разрешение зависит от расстояния между соседними ганглиозными клетками: чем меньше расстояние, тем выше разрешение. Строго говоря, разрешение зависит от расположения не тел клеток, а их рецептивных полей. Размер и площадь рецептивного поля ганглиозной клетки определяются характеристиками дендритного ветвления, которое охватывает область вокруг тела, так что дендритные поля всех клеток перекрывают всю площадь сетчатки (Wässle et al., 1981). В первом приближении можно принять, что рецептивное поле ганглиозной клетки расположено вокруг ее тела. Исключение составляют только высокоспециализированные сетчатки высших приматов и человека, у которых тела биполярных и ганглиозных клеток, обслуживающих центральную (фовеальную) область, вынесены за пределы этой области, чем достигается минимальное рассеяние света, попадающего на рецепторы. У китообразных такая высокоспециализированная структура не наблюдается, поэтому разрешающую способность сетчатки можно оценивать по расположению тел ганглиозных клеток.

В первом приближении межклеточные расстояния могут быть рассчитаны исходя из плотности клеток простейшим образом:

$$r = 1/\sqrt{D}, \quad (1)$$

где r — среднее межклеточное расстояние и D — плотность клеток (количество на единицу площади). Эта формула дает точное межклеточное расстояние для регулярного прямоугольного массива элементов. Поскольку расположение ганглиозных клеток в сетчатке не идеально регулярно, реальные расстояния между клетками могут быть больше или меньше, чем заданные формулой, т.е. формула дает лишь приблизительную усредненную оценку межклеточных расстояний. Тем не менее таким простым способом ретиальная разрешающая способность была оценена для ряда видов животных, и полученные оценки неплохо сходились с оценками остроты зрения, полученными в поведенческих исследованиях млекопитающих и птиц (Herman et al., 1975; Reymond, 1985; Harman et al., 1986; Pettigrew et al., 1988; Mass, Supin, 2007). Результаты ранних исследований в этом направлении обобщены в обзорах (Hughes, 1977; Mass, Supin, 2007).

Однако способность массива клеток различать близкорасположенные элементы изображения зависит не только от плотности элементов массива, но и от их взаимного расположения, а именно, от степени регулярности. Если клетки расположены в случайном порядке, то в массиве имеются как близко, так и далеко расположенные клетки; соответственно, в этих участках массива разрешающая способность будет различаться. При расположении клеток в виде регулярной решетки разрешающая способность будет одинаковой во всех частях массива и близка к той, которая определяется формулой (1). Реально расположение ганглиозных клеток по площади сетчатки не идеально регулярно, но и не вполне хаотично. Поэтому степень регулярности расположения клеток является важным показателем, влияющим на ретиальное разрешение.

Если расположение клеток не строго регулярно и обнаруживает некоторую степень случайного разброса, то регулярность всего массива может быть оценена с применением статистического подхода. Предложено несколько методов статистической оценки регулярности массива. Эти методы были с успехом применены к ганглиозным клеткам сетчатки.

Один из успешно применявшихся методов — оценка статистического распределения расстояний от каждой из клеток до ближайшего соседа: nearest-neighbor distance, NND (Wässle, Riemann, 1978; Wässle et al., 1978). При таком анализе измеряется расстояние от каждой клетки в исследуемом образце до ближайшей соседней клетки (NND-значение); по данным этих измерений строится распределение вероятности нахождения соседней клетки от расстояния. В работе (Wässle, Riemann, 1978) показано, что для массива с случайным расположением элементов теоретиче-

ское распределение является рэлеевским распределением и описывается формулой

$$p(r) = 2\pi Dr \exp(-\pi Dr^2), \quad (2)$$

где $p(r)$ — вероятность нахождения ближайшей клетки на расстоянии r и D — плотность элементов массива, т.е. количество элементов на единице площади. Такое распределение имеет среднее значение

$$m = \int_0^{\infty} 2\pi Dr^2 \exp(-\pi Dr^2) dr = 0.5\sqrt{D}. \quad (3)$$

Если экспериментально найденное NND-распределение соответствует формуле (2) и имеет среднее значение, равное или близкое к $0.5\sqrt{D}$, то положение элементов массива (клеток) можно считать хаотическим. Если же NND-распределение существенно отличается от описанного выше, то массив характеризуется некоторой степенью упорядоченности. Как правило, в упорядоченном массиве среднее значение NND-распределения больше, чем в случайном, поскольку при случайном расположении элементов какие-то из них могут оказаться неограниченно близко друг к другу, тогда как при упорядоченном расположении между элементами соблюдается некоторое минимальное расстояние. Упорядоченность тем значительнее, чем больше отличие NND-распределения от того, что характерно для случайного массива.

При несомненном достоинстве NND-показателя, который позволяет объективно оценить степень регулярности, этот метод имеет очевидные ограничения. Главное ограничение обусловлено тем, что для оценки степени регулярности используется расположение только одной ближайшей клетки и игнорируется положением других клеток. От этого недостатка свободен метод, получивший название построения пространственных автокоррелограмм (Rodieck, 1991). Для получения пространственной автокоррелограммы (ПАКГ) вокруг каждого элемента массива (каждой клетки) подсчитывается плотность остальных элементов как функция расстояния от “центрального” элемента; результаты для всех “центральных” элементов усредняются. При случайном (хаотичном) расположении плотность элементов одинакова на любом расстоянии от “центрального” элемента, поскольку вероятность появления элемента в некоторой точке никак не зависит от того, находится ли рядом другой элемент. При упорядоченном или частично упорядоченном расположении элементов вокруг каждого из них имеется зона, в которой нет других элементов. На трехмерных графиках эта зона выглядит как провал вокруг центра ПАКГ, из-за чего была обо-

значена как “колодец” (a well). Наличие такого “колодца” — признак упорядоченности.

Предлагались и другие критерии оценки упорядоченности расположения клеток в сетчатке, в частности, это измерение площадей клеточных доменов (Reese, Galli-Resta, 2002; Raven, Reese, 2003). Методы NND-распределений и ПАКГ получили наибольшее признание. Мы использовали методы NND-распределений и ПАКГ для того, чтобы оценить, меняется ли упорядоченность ганглиозных клеток сетчатки дельфинов в процессе постнатального онтогенеза. Для этого сравнивали показатели упорядоченности ганглиозных клеток сетчатки у новорожденного и у взрослого бутылконового дельфина *Tursiops truncatus*.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Работа выполнена на материале, собранном на Утришской морской станции РАН. Материалом служили глаза взрослых бутылконосых дельфинов (афалин) *Tursiops truncatus*.

Материал от новорожденного животного получен от одного дельфиненка (длина тела около 1 м), погибшего вследствие неблагоприятного течения родов. Материал от взрослого животного получен от самки, погибшей из-за заболевания, не связанного с поражением органов зрения. Таким образом, для исследования были доступны два глаза новорожденного и два глаза взрослого животного. Все доступные образцы были использованы для изготовления тотальных препаратов сетчатки.

Для получения препаратов глазные яблоки, извлеченные из тела, были фиксированы в 10%-ном формалине. Перед извлечением глаза из орбиты были помечены дорзальный, вентральный, назальный и темпоральный полюсы глазного яблока. Эти метки в дальнейшем использовали для ориентировки сетчатки. Удаляли роговицу, радужку, хрусталик и стекловидное тело глаза. Отмечали положение полюсов сетчатки (дорзального, вентрального, назального и темпорального) относительно ранее помеченных полюсов глазного яблока.

Сетчатку отделяли от пигментного эпителия и целиком извлекали из глазного бокала. Делали периферические радиальные надрезы для того, чтобы расправить сетчатку на плоском стекле. Сетчатку наклеивали на предметное стекло ганглиозным слоем вверх и высушивали на воздухе. Препарат окрашивали методом Ниссля 0.1%-ным раствором крезил-виолета под визуальным контролем так, чтобы прокрасился только поверхностно лежащий ганглиозный слой, без прокрашивания глубоких слоев. Такая окраска обеспечивала прокрашивание всех поверхностно лежащих ганглиозных клеток, что является важ-

ным условием для исследования расположения клеток. После окрашивания препарат дегидратировали в спиртах, просветляли в ксилоле и заключали в заливочную среду Permount (Electron Microscopy Sciences, США). Поскольку сетчатка была приклеена на стекло до дегидратации, незначительная усадка препарата наблюдалась только по ее краям.

После изготовления тотальных препаратов сетчатки выполнялось их предварительное микроскопирование с целью выявления зон максимальной концентрации ганглиозных клеток. Для этого объектив микроскопа (Olympus BX41 Shinjuku, Tokyo, Japan) фокусировали на глубину ганглиозного слоя и ганглиозные клетки подсчитывали через 1 мм в квадратах площадью 0.25 мм^2 . По результатам предварительного исследования выявляли области максимальной концентрации клеток в назальном и темпоральном секторах сетчатки. Выделенные области высокой концентрации клеток фотографировали (цифровая фотокамера Moticam 2300, Motic Hong Kong Limited, Hong Kong). Таким образом, на каждом из объектов (новорожденный и взрослый дельфин) было получено по четыре микрофотографии клеток в ганглиозном слое в зонах высокой концентрации (два глаза, в каждом назальная и темпоральная зоны).

На каждой из полученных микрофотографий измеряли координаты всех ганглиозных клеток. Для оцифровки измерений применяли программу Motic Image Plus 2.0 (Motic Hong Kong Limited,). Результаты измерений использовали для построения карт расположения ганглиозных клеток в выбранных образцах, NND-распределений и пространственных автокоррелограмм.

Для построения распределений и ПАКГ применяли программы собственной разработки, созданные с использованием программной оболочки LabVIEW (National Instruments, США).

При вычислении NND-распределения программа, используя введенные координаты клеток, рассчитывала расстояние от выбранной (“центральной”) клетки до каждой из остальных клеток массива; из полученных значений выбиралось наименьшее, которое принимали за NND. Значения NND, полученные для всех клеток, программа сортировала в бины с шагом δr (где r — расстояние) и строила гистограмму, показывающую, сколько NND значений найдено в каждом бине.

При вычислении ПАКГ программа, используя введенные координаты клеток, подсчитывала количество клеток в кольцевых участках с внутренним диаметром $r - \delta r/2$ и наружными диаметром $r + \delta r/2$; кольцевые участки располагались концентрически вокруг каждой из клеток; значение r варьировали с заданным шагом δr . По результа-

там подсчетов рассчитывалась плотность D клеток в каждом кольце. Данные, полученные для всех клеток, усредняли, и по усредненным данным строили функцию зависимости D от радиуса r .

При вычислении как распределений NND, так и ПАКГ учитывали то обстоятельство, что если клетка расположена близко к краю исследуемого участка, то расположение других клеток со стороны края участка неизвестно. Поэтому в качестве “центральной” клетки, от которой программа NND отсчитывала расстояния до других клеток и вокруг которой программа ПАКГ определяла плотность других клеток, использовали не все клетки массива, а только те, которые находились от края исследуемого участка на расстоянии не меньше, чем максимальное значение NND или максимальная длина ПАКГ.

На примерах, приведенных на рис. 1, это клетки, расположенные в прямоугольнике размером $700 \times 500 \text{ мкм}$; при размере всего исследуемого участка $800 \times 600 \text{ мкм}$, т.е. “центральные” клетки находились на расстояниях от краев участка не менее 50 мкм . Это позволяло получать NND-распределения и ПАКГ в диапазоне до 50 мкм .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Каждая из микрофотографий, по которым производили измерения, охватывала область сетчатки размером $0.8 \times 0.6 \text{ мм}$, т.е. площадь, равную 0.48 мм^2 . На этой площади насчитывалось (в среднем по четырем образцам) 260 ганглиозных клеток у новорожденного и 290 клеток у взрослого животного, что давало плотность соответственно 542 и 604 клетки/ мм^2 .

На рис. 1 приведены примеры массивов, образуемых ганглиозными клетками сетчатки новорожденного (*а*) и взрослого (*б*) животного (по одному произвольно выбранному образцу из четырех доступных). Каждая точка приведенных массивов имеет координаты, полученные для ганглиозной клетки. Приведенные примеры позволяют отметить некоторые различия в расположении клеток у новорожденного и у взрослого животного. Различия можно охарактеризовать тем, что в первом случае (*а*) наблюдалось большее количество групп сближенных точек, за счет чего вне этих групп имелись участки разрежения. Во втором случае (*б*) также наблюдалась неравномерность расположения клеток, но группы тесно сближенных точек были менее явно выражены, соответственно менее выражены были участки разрежения, т.е. расположение клеток было более равномерным.

Для сравнения на рис. 2 приведен искусственно сгенерированный массив, составленный тем же количеством точек, вписанных в прямоугольник такой же площади размером $0.8 \times 0.6 \text{ мм}$; ко-

ординаты точек в этом массиве задавались случайными числами в диапазоне от 0 до 800 мкм по оси абсцисс и от 0 до 600 мкм по оси ординат. Этот массив характеризуется существенной неравномерностью расположения точек, более выраженной, чем для клеток сетчатки: наблюдаются как многочисленные группы близко расположенных точек, так и значительные по площади участки разрежения.

Для объективной характеристики наблюдаемых отличий вычислены NND-распределения и ПАКГ для массивов клеток в имеющихся образцах.

NND-распределения. NND-распределения, каждое из которых получено усреднением распределений для четырех образцов сетчатки новорожденного (*а*) и взрослого животного (*б*), приведены на рис. 2.

NND-распределение, полученное для сетчатки новорожденного животного (*а*), имело максимум на расстоянии 25 мкм; распределение, полученное для взрослого животного (*б*), имело размытый максимум на 23–27 мкм. Средние значения NND составляли 25.9 и 25.3 мкм соответственно для новорожденного и взрослого животного. При средней плотности ганглиозных клеток 541.7 клеток/мм² (260 клеток в поле 800 × 600 мкм) у новорожденного и 604.2 клеток/мм² (290 клеток в поле 800 × 600 мкм) у взрослого животного (290 клеток в поле 800 × 600 мкм) указанные средние значения NND-распределений составили соответственно 60.3 и 62.2% от среднего межклеточного расстояния, вычисляемого по формуле (1).

Приведенное для сравнения NND-распределение массива из 260 точек в поле 800 × 600 мкм имело другую форму и среднее значение 21.5 мкм, что практически совпадает с теоретическим предсказанием по формуле (3).

Таким образом, NND-распределения для новорожденного и для взрослого животного отличаются от распределения для случайного массива, что указывает на определенную степень упорядоченности. Различия между распределениями для новорожденного и взрослого животного пренебрежимо малы.

Пространственные автокоррелограммы. ПАКГ, каждая из которых получена усреднением функций для четырех образцов новорожденного (*а*) и взрослого животного (*б*), приведены на рис. 3.

Для сравнения приведена пространственная автокоррелограмма случайного массива из 260 точек в поле 0.8 × 0.6 мм, что дает плотность 542/мм².

Автокоррелограммы массивов клеток сетчатки (*а, б*) характеризуются наличием интервала, (“коллода”, окружающего каждую клетку), в котором плотность окружающих клеток минимальна. Этим они отличаются от автокоррелограммы случайного массива, которая указывает на отсут-

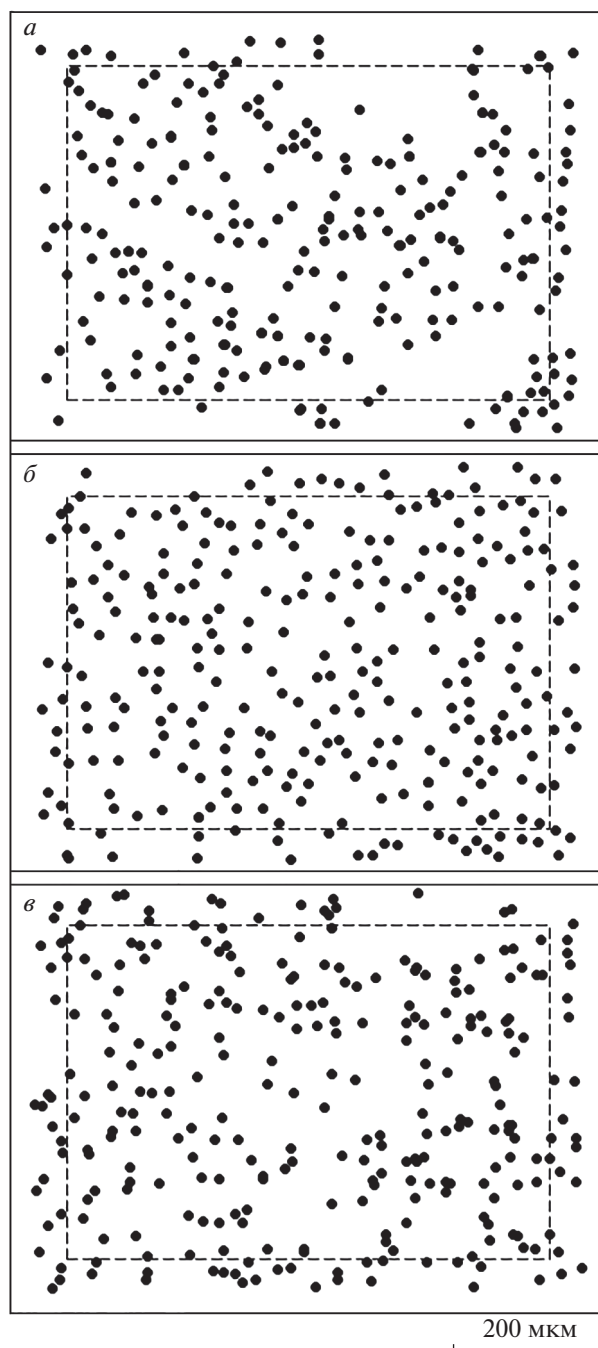


Рис. 1. Примеры расположения ганглиозных клеток в сетчатке новорожденного — *а* и взрослого — *б* бутылконового дельфина в сравнении со случайным массивом элементов — *в*.

Каждое поле имеет размер 800 мкм по горизонтали и 600 мкм по вертикали. В полях *а* и *б* координаты каждой точки соответствуют координатам ганглиозной клетки, измеренным на микрофотографиях участков сетчатки с высокой концентрацией ганглиозных клеток. В поле *в* координаты точек заданы случайными числами в диапазоне от 0 до 800 по горизонтали и от 0 до 600 по вертикали. Пунктирные линии обозначают участок, в котором точки находятся не ближе 50 мкм к краю поля.

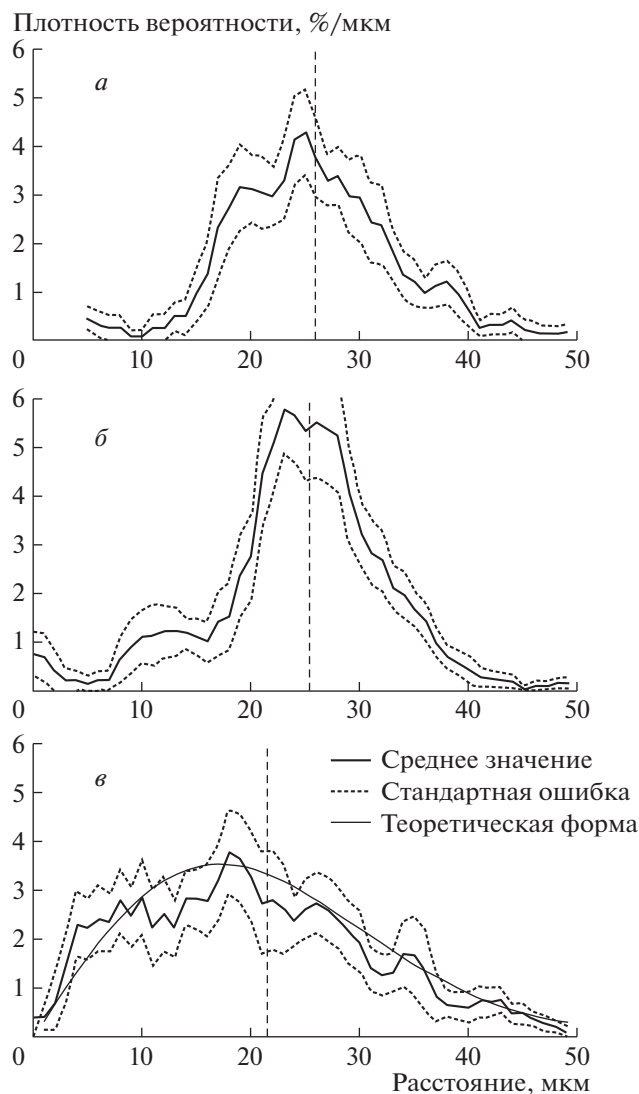


Рис. 2. NND-распределения, полученные для ганглиозных клеток сетчатки новорожденного — *а* и взрослого — *б* животного; *в* — распределение для случайного массива точек.

Представлены средние значения из четырех образцов и стандартные ошибки среднего; на *в* также представлена теоретическая форма распределения в соответствии с формулой (2). Объемы выборок: *а* — 260 клеток в поле 800×600 мкм, в том числе 222 клетки, *от которых* измеряли расстояния до окружающих клеток (в участках, ограниченных пунктирными линиями на рис. 1); *б* — соответственно 290 и 241 клеток; *в* — 260 и 210 точек.

ствие “колодца” (*в*). За пределами “колодца” плотность клеток незначительно превышает среднее значение, а на большом удалении приближается к среднему значению.

Радиус “колодца” в сетчатке новорожденного животного меньше, чем в сетчатке взрослого. Если принять за условную меру радиуса “колодца” значение, при котором плотность клеток составляет 50% от средней плотности, то для ново-

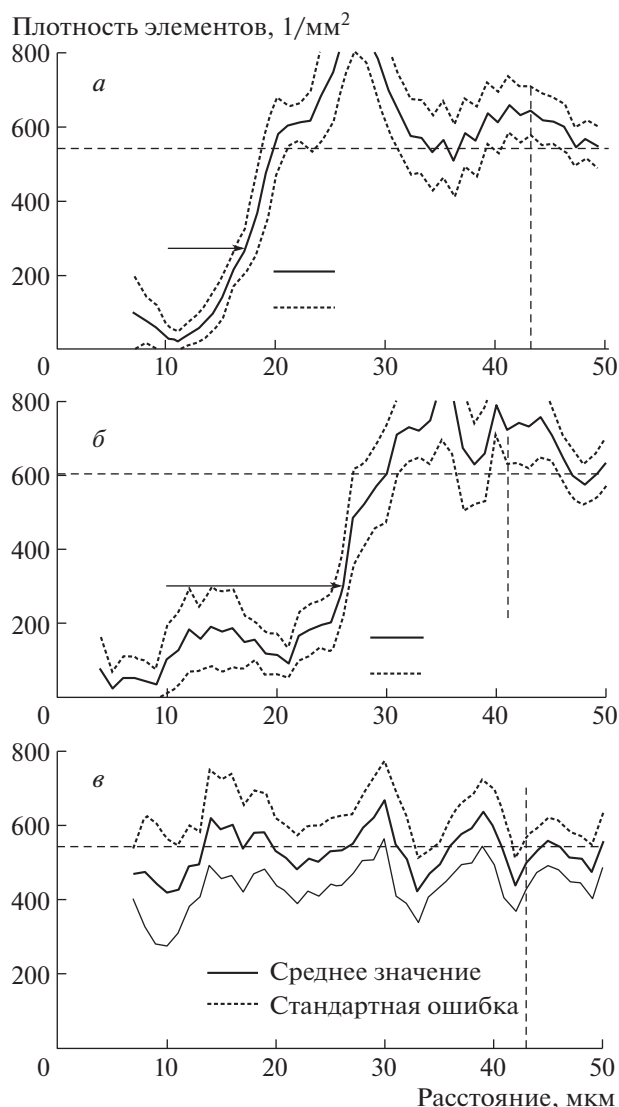


Рис. 3. ПАКГ, полученные для ганглиозных клеток сетчатки новорожденного — *а* и взрослого — *б* животного; *в* — распределение для случайного массива точек. Представлены средние значения из четырех образцов и стандартные ошибки среднего. Горизонтальная пунктирная линия — средняя плотность элементов, вертикальная пунктирная линия — среднее межклеточное расстояние, вычисленное по формуле (1); горизонтальные стрелки указывают радиус “колодца” на уровне 0.5 от средней плотности элементов. Объемы выборок: *а* — 260 клеток в поле 800×600 мкм, в том числе 222 клетки, *вокруг которых* измеряли плотность окружающих клеток (в участках, ограниченных пунктирными линиями на рис. 1); *б* — соответственно 290 и 241 клеток; *в* — 260 и 210 точек.

рожденного животного это значение составляет 17 мкм, тогда как для взрослого — 26 мкм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ожидаемый результат проведенного анализа состоит в том, что как NND-распределения, так и

пространственные автокоррелограммы указывают на некоторую степень упорядоченности расположения элементов в сетчатке как новорожденного, так и взрослого животного. Об этом свидетельствуют отличия NND-распределений и пространственных автокоррелограмм от аналогичных функций, полученных для массива случайно расположенных точек.

В NND-распределениях эти отличия проявляются:

– в низкой вероятности NND-значений менее 14 мкм у новорожденного и менее 16 мкм у взрослого животного, тогда как в случайном массиве точек такие NND представлены в значительном количестве;

– в большем среднем значении NND-распределений и в наличии “колодца” в ПАКГ массивов клеток сетчатки (низкая плотность окружающих клеток вокруг каждой из клеток сетчатки), что не характерно для массивов случайно расположенных точек.

Эти признаки отражают низкую вероятность нахождения клеток сетчатки в непосредственной близости друг от друга, тогда как в случайном массиве нет никаких ограничений на взаимное расположение точек.

Представляют интерес различия между новорожденным и взрослым животным в статистических характеристиках расположения ганглиозных клеток. Эти различия проявляются в пространственных автокоррелограммах: область вокруг каждой из клеток, в которой другие клетки редки или отсутствуют (“колодец”), у взрослого животного шире радиус (26 мкм), чем у новорожденного (радиус 17 мкм). Радиус колодца у взрослой особи ближе к среднему межклеточному расстоянию (41 мкм), вычисленному по формуле (1), чем у новорожденного, что может указывать на большую упорядоченность клеток. Причем коли-

чество клеток в образцах, полученных от взрослого животного (в среднем по четырем образцам 290 клеток на площади 0.48 мм², что дает 604 клетки/мм²), было несколько больше, чем в образцах, полученных от новорожденного (260 клеток, 542 клетки/мм²). При прочих равных условиях можно ожидать, что следствием большей плотности клеток будет их более тесное расположение, следовательно, менее широкая зона, свободная от окружающих клеток, вокруг каждой из клеток в сетчатке взрослого животного. На самом деле наблюдали обратное соотношение: в сетчатке взрослого животного эта зона шире, что возможно за счет более регулярного расположения клеток.

Если принять вывод, что в сетчатке взрослого животного расположение клеток более регулярно, чем у новорожденного, то возникает вопрос: почему это различие не нашло отражения в NND-распределениях. Скорее всего это связано с тем, что NND-распределения принимают во внимание расположение только одной клетки, ближайшей к “центральной” клетке, тогда как ПАКГ – расположение всех окружающих клеток. Поэтому показатель ПАКГ можно считать более информативным, чем показатель NND. Это объясняет различие в результатах, полученных с применением двух разных показателей. Так или иначе, пространственная автокорреляция указывает на более упорядоченное расположение клеток сетчатки у взрослого животного по сравнению с новорожденным.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что формирование пространственной организации сетчатки у дельфина не заканчивается к моменту рождения, но продолжается в процессе постнатального онтогенеза. Это формирование состоит в продолжающемся упорядочении взаимного расположения ганглиозных клеток.

Ganglion cell regularity in the dolphin's retina improves during the postnatal ontogenesis

A. M. Mass^{a, #} and A. Ya. Supin^a

^a Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences 119071 Moscow, Leninsky prospect, 33, Russia

[#] E-mail: alla-mass@mail.ru

Regularity of distribution of retinal ganglion cells in zones of high resolution was investigated in a new-born and adult bottlenose dolphin *Tursiops truncatus*. Two criteria of cell regularity were employed: (i) Distribution of inter-cell nearest-neighbor distances (NND-distribution) and (ii) surrounding cell density around each cell (the spatial autocorrelation function, SACF). NND-distributions of ganglion cells for both the new-born and adult subjects differed from those of random arrays. This difference is considered an indication of regularity of cell distribution. NND-distributions were similar for the new-born and adult subjects. SACFs of ganglion cells for both the new-born and adult subjects differed from that of a random array by the presence of a “well”, i.e., an area around each of the cells where other cells were rare or absent. By this feature, SACFs of the ganglion cells differed from those of random arrays. In the adult subject, the radius of the “well” was larger than in the new-born one. This difference is considered an indication of a better regularity of distribution

in the adult subject than in the new-born one. The similarity of NND-distributions in the new-born and adult animals is explained by a poorer informativity of the NND-analysis. It is suggested that the spatial distribution of retinal ganglion cells in dolphins improves during the postnatal ontogenesis. This improving increases the regularity of mutual positions of ganglion cells.

Key words: dolphin, retina, ganglion cells, nearest-neighbor distance, spatial autocorrelation

REFERENCES

- Harman A.M., Nelson J.E., Crewther S.G., Crewther D.P. Visual acuity of the northern native cat (*Dasyurus hallucatus*) – behavioral and anatomical estimates. *Behav. Brain Res.* 1986. V. 22. P. 211–216.
- Herman L.M., Peacock M.F., Yunker M.P., Madsen C.J. Bottlenosed dolphin: Double-slit pupils yields equivalent aerial and underwater diurnal acuity. *Science*. 1975. V. 189. P. 650–652.
- Hughes A. The topography of vision in mammals of contrasting life style: Comparative optics and retinal organization. *Handbook of Sensory Physiology: The Visual System in Vertebrate*. Ed. Crescitelli F. Berlin. Springer. 1977. V. VII/5. P. 613–765.
- Mass A.M., Supin A.Ya. Adaptive features of aquatic mammals' eye. *Anatomical Rec.* 2007. V. 290. P. 701–715.
- Mass A.M., Supin A.Ya. Ganglion cell topography and retinal resolution in the bottlenose Dolphin *Tursiops truncatus* at an early stage of postnatal development. *Biology Bull.* 2020. V. 47. P. 665–673.
- Pettigrew J.D., Dreher B., Hopkins C.S., McCall M.J., Brown M. Peak density and distribution of ganglion cells in the retina of microchiroptean bats: implication for visual acuity. *Brain Behav. Evol.* 1988. V. 32. P. 39–56.
- Raven M.A., Reese B.E. Mosaic regularity of horizontal cells in the mouse retina is independent of cone photoreceptor innervation. *Invest. Ophthalmol. and Visual Sci.* 2003. V. 44. P. 965–973.
- Reese B.E., Galli-Rest a L. The role of tangential depression in retinal mosaic formation. *Progr. in Retinal and Eye Res.* 2002. V. 21. P. 153–168.
- Reymond L. Spatial visual acuity of the eagle, *Aquila audax*: A behavioral, optical, and anatomical investigation. *Vision Res.* 1985. V. 25. P. 1477–1491.
- Rodieck R.W. The density recovery profile: A method of the analysis of points in the plain applicable to retinal studies. *Visual Neurosci.* 1991. V. 6. P. 95–111.
- Wässle A., Riemann H.L. The mosaic of nerve cells in the mammalian retina. *Roc. R. Soc. Lond. B.* 1978. V. 200. P. 441–461.
- Wässle A., Peichl L., Boycott B.B. Topography of horizontal cells in the retina of the domestic cat. *Roc. R. Soc. Lond. B.* 1978. V. 203. P. 269–291.
- Wässle A., Peichl L., Boycott B.B. Dendritic territories of cat retinal ganglion cells. *Nature*. 1981. V. 292. P. 344–345.

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОВСЕДНЕВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР ГЛАЗА ЯПОНСКОГО ПЕРЕПЕЛА *COTURNIX JAPONICA*

© 2022 г. Н. Н. Трофимова^{1,*}, Ю. С. Петронюк¹, Т. С. Гурьева², Е. И. Медникова², П. П. Зак¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН
119991 Москва, ул. Косыгина, д. 4, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН
123007 Москва, Хорошевское шоссе, д. 76А, Россия

*E-mail: ntrofimova@mail.ru

Поступила в редакцию 25.03.2022 г.

После доработки 12.04.2022 г.

Принята к публикации 28.04.2022 г.

Размеры растущего детского глаза оперативно подстраиваются под фокусировку доминантной спектральной полосы освещения. Именно преобладающий вид освещения играет важную роль в формировании глазного яблока в детском возрасте. Повседневное использование ламп с преобладанием в спектральном составе красной компоненты может привести к удлинению глаза (миопия или близорукость) в самый ответственный период развития. Эти изменения могут носить в том числе и необратимый характер. В данном исследовании были проведены измерения различных параметров глаз птенцов перепела в разных возрастных точках в период созревания. Для измерений использовался метод акустической микроскопии. Измерения проводились для двух групп птиц. В качестве повседневного освещения были взяты: в первом случае лампа накаливания, во втором – светодиодный светильник с доминирующей спектральной полосой 525–700 нм. Полученные результаты показывают недостатки применения лампы накаливания как повседневного освещения для детей в период формирования глазного яблока.

Ключевые слова: глаз, детская близорукость, повседневное освещение, перепел японский, акустическая микроскопия

DOI: 10.31857/S0235009222030088

ВВЕДЕНИЕ

Детский глаз находится в стадии формирования. Его рефракция в процессе взросления всецело зависит от зрительного опыта, который ему сопутствует. Для того чтобы этот процесс проходил без последствий, нужно соблюдение соответствующих условий. Важнейшим из условий является повседневное освещение. Рост случаев детской миопии неуклонно растет и правильное искусственное освещение, в отсутствие дневного, выходит на первый план (Зак, Островский, 2012; Зак, 2015).

Несмотря на появление новых искусственных источников света (люминесцентные, светодиодные) лампы накаливания по-прежнему имеют достаточно широкое распространение. Это обусловлено высоким индексом цветопередачи, отсутствием мерцания и, прежде всего, низкой ценой и традициями.

Недостатком лампы накаливания является большая “красная” составляющая ее спектра. Этот показатель имеет величину на 44% больше для спектра ламп накаливания, чем для солнечного света (Пашков, 2004).

Для изучения этой проблемы в ускоренной шкале времени были выбраны в качестве модели глаза птенцов перепела японского (*Coturnix japonica*). В настоящее время использование этих животных является перспективным в работах по моделированию и профилактике детской миопии (Llombart et al., 2009).

Аналогичная модель была предложена американскими учеными и с использованием домашних кур (Wisely et al., 2017).

Перепел японский — некрупная домашняя птица, весом до двухсот грамм. Это уникальная животная модель для изучения возрастной физиологии глаза. Перепел так же является ориги-

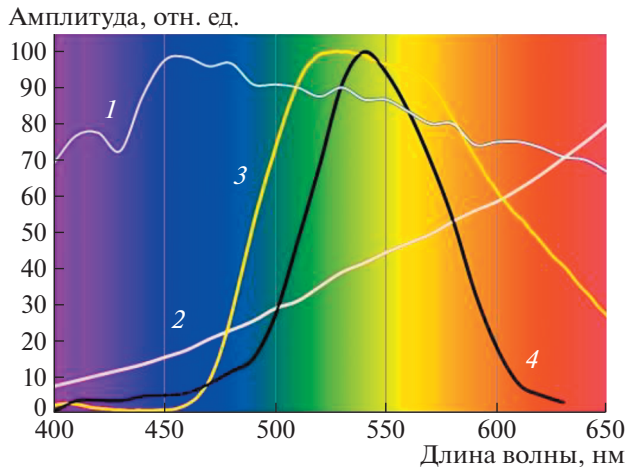


Рис. 1. Спектры излучения естественного дневного (1) и искусственных источников освещения: лампа накаливания (2); светодиодный светильник с желтым светофильтром (3). Спектральная чувствительность центральных колбочек сетчатки человеческого глаза (4).

нальной животной моделью зрительных нарушений различной этиологии (Зак, 2015; Донцов и др., 2017; Петронюк и др., 2022). Преимущество и оригинальность этой модели состоит в том, что в отличие от лабораторных грызунов и наравне с человеком перепел имеет колбочко-палочковую сетчатку и центральную зону острого зрения. Эффективность исследования возрастных изменений на перепелах обусловлена биологическим сроком жизни птицы. Всего за один год можно отследить все возрастные фазы развития глаза. Развитие детской близорукости у человека происходит за период от полугода до полутора лет (Карпенко, Тимаков, 2016). У перепела этот период длится около месяца.

В данном исследовании нами была проведена методическая работа по выявлению закономерностей формирования структур глаза у птенцов японского перепела. Цель исследований — определение зависимости роста глаза и его структур от спектральных характеристик повседневного освещения. Для этой задачи птенцов суточного возраста разделили на группы. Каждая группа содержалась при повседневном освещении с заданными спектральными характеристиками. Длительность эксперимента была обусловлена особенностями полового созревания этого вида птиц — 35–45 дней.

Использовались два вида освещения: лампа накаливания 40 Вт и светодиодный светильник с желтым светофильтром $\lambda = 500–700$ нм (рис. 1).

Спектр используемого нами в эксперименте светильника был приближен к спектру “центральных” колбочек сетчатки человека. Работа

проводилась совместно с лабораторией акустической микроскопии ИБХФ РАН.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Для выполнения экспериментов брали близких по возрасту птенцов японского перепела, инкубированных из яиц. Исходную линию птиц приобретали в ООО “Генофонд”, Сергиев Посад. С момента вылупления из яиц и до достижения суточного возраста птенцов содержали при стандартных условиях повседневного освещения. Таким стандартом для перепелов были лампы накаливания 40 Вт, что необходимо для адаптации птенцов к самостоятельному нахождению воды и пищи.

Далее птенцов делили на две группы с разными условиями повседневного освещения. Монохроматические источники света были выровнены по квантовому составу. Одна группа была контрольной и содержалась с использованием ламп накаливания (Philips, 40 Вт, матовая, освещенность 130 лк). Вторая группа содержалась при использовании светодиодного светильника (Меридиан, IP40, 10 Вт, призматический, освещенность 125 лк, расстояние 40 см, энергия $1825 \text{ мкВт/см}^2/\text{нм}$, мощность 98.5 Дж) с доминирующей спектральной полосой 525–700 нм ($\lambda_{\text{макс.}} = 530$ нм), что соответствует чувствительности MWS-колбочек (рис. 1). Для обеспечения нужной длины волны света на светодиодном светильнике закреплялся в два слоя желтый светофильтр (Roskoe-color #101).

Во избежание нежелательного бокового засвета боковые поверхности заклеивали черной изолентой. Источники освещения прошли необходимый контроль и спектрометрическую калибровку для обеспечения физиологического уровня освещенности ≈ 200 лк. Калибровку проводили спектрометром МК-350 (Uptech, Тайвань). Суточный режим освещения задавался таймером на 9 ч (ночь) и 15 ч (день). Необходимый обогрев осуществляли инфракрасными обогревателями мощностью 50 Вт. Использовали стандартный корм ПК 5–41, разработанный специально для птенцов перепела. Содержание птиц и их вывод из эксперимента декапитацией выполняли согласно “Правилам надлежащей лабораторной практики”, утвержденным Приказом Министерства здравоохранения РФ от 1 апреля 2016 г. N 199н.

Для эксперимента брали птенцов перепела в возрастном диапазоне от 10 до 45 дней. Для группы с повседневным желтым светом птенцы, взятые для эксперимента, были возрастом 10, 20, 28 и 34 сут. Для группы с лампой накаливания в качестве повседневного освещения возраст птиц был 14, 24, 27, 45 сут. Для получения большей достоверности при сравнительном анализе ультра-

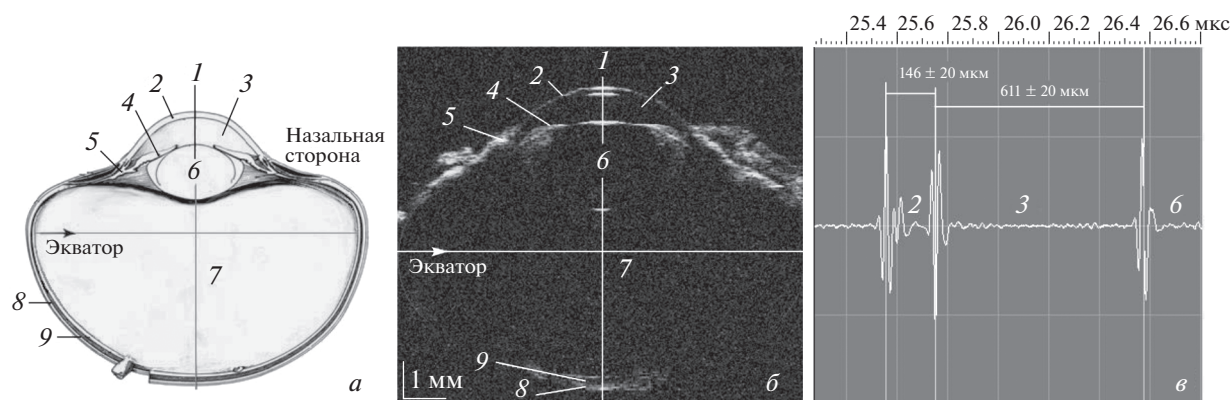


Рис. 2. Ультразвуковая биомикроскопия энуклеированного глаза половозрелой особи перепела *Coturnix japonica*:

a – схематичное изображение; *б* – акустическое В/Д изображение поперечного сечения со стороны роговицы; *в* – осциллограмма импульсов переднего отдела: 1 – оптическая ось; 2 – роговица; 3 – передняя камера; 4 – радужка; 5 – соединительнотканное образование между ресничным краем радужки и роговицей; 6 – хрусталик; 7 – стекловидное тело; 8 – склера; 9 – хориоретинальный комплекс.

звуковых данных птенцов перепела взвешивали и калибровали по весу ± 10 г с точностью 1 г. Исследовали левый и правый глаз у трех птиц каждого возраста.

Для изучения структур глаза в процессе его роста в работе применяли ультразвуковые методы (УЗИ) высокого разрешения. С начала 90-х годов (Pavlin et al., 1991) ультразвуковая биометрия применяется в офтальмологии для исследования мелких структур. Датчиками с частотой 20 МГц исследуются такие элементы глаза, как сетчатка, хориоидея и склера (Coleman et al., 2004). С повышением частоты измерительной ультразвуковой системы возрастает пространственное разрешение визуализации, но одновременно уменьшается глубина проникновения. Акустическая микроскопия (АМ) активно применяется в научных исследованиях биологических объектов, в том числе офтальмологической направленности (Foster et al., 2003; Nakamura et al., 2013; Pavlin et al., 1993; Presby et al., 2020). В основе высокочастотной импульсной АМ лежат принципы эхо метода – отражения и затухания ультразвука в биотканях. Акустическая линза генерирует короткие фокусированные импульсы, проникающие сквозь структуры глаза и отражающиеся от поверхности тканей с различной плотностью и упругостью. Эхосигналы от границ раздела и неоднородностей биотканей принимаются тем же акустическим датчиком, при этом регистрируются их амплитуда и время задержки. По величине амплитуды можно судить о физических особенностях структурных элементов, а время задержки соответствует глубине их расположения. Ультразвуковые измерения и электронная обработка сигналов позволяют определить скорости звука в структурных элементах глаза, расстояние между элементами и геометрию глазного яблока.

Для визуализации использовали режим В-сканирования в сочетании с динамической фокусировкой (В/Д-scan). Малоапертурный фокус ультразвукового зондирующего пучка перемещали по поверхности глазного яблока вдоль одной из его осей (экватора), затем фокус смещали вглубь с шагом 25 мкм и операцию повторяли. Таким образом, обеспечивался максимальный акустический контраст по всей глубине глаза. На рис. 2 представлено В/Д-изображение глаза перепела в возрасте 30 сут.

Можно видеть границы роговицы, передней камеры, хрусталика, хориоретинального комплекса и склеры. Осциллограмма эхоимпульсов (*в*) позволяет измерять время задержки Δt между границами структурных элементов и определять их размеры $D = 0.5(vt)$, где v – скорость звука в образце. Следует отметить, что величина скорости звука для таких обводненных тканей, как глаз, близка к скорости звука в воде (1490 м/с). Эта величина несколько отличается для хрусталика (1620 м/с) и склеры (1540 м/с), поскольку ткани имеют более плотную структуру (Hill et al., 2004). Приведенные выше значения использовались нами для измерений.

Применяемая в данной работе методика была разработана и опробована на цыплятах японского перепела возрастом 10 и 20 дней в сравнении с взрослыми животными (Зак и др., 2019). Исследования выполняли при помощи ультразвуковых акустических микроскопов, разработанных в ИБХФ РАН. В условиях *in vitro* применяли двумерное В/Д-сканирование с визуализацией эхолокационного “разреза” глаза от верхушки роговицы до основания зрительного нерва в назально-дорсальной плоскости.

Акустический микроскоп был оснащен объективом с рабочей частотой 50 МГц, малой угловой апертурой 22° и фокусным расстоянием 13 мм. Перемещение акустической линзы осуществляли прецизионными двигателями с шагом 25 мкм по оси вдоль экватора и по глубине вдоль оптической оси глаза. Эхо-импульсным методом измеряли толщину структурных элементов глаза с абсолютной погрешностью ± 20 мкм. Измерения проводили со стороны роговицы при их естественном положении в глазных орбитах. Ультразвуковая микроскопия требует применения иммерсионной жидкости, в данном случае роль иммерсии выполняли дистиллированная вода и ультразвуковой гель низкой вязкости.

Исследования проводили при комнатной температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Время проведения одного измерения, не учитывая подготовку и настройку прибора, составляло около 20 мин.

Статистическую обработку результатов измерения проводили при помощи программы Excel. Данные, полученные в результате акустомикроскопических измерений, были проверены на нормальность распределения. Внутри каждой выборки определены медианные значения величины и соответствующие доверительные интервалы. В тексте приведены медианные значения размеров (X), доверительные интервалы ($\pm E$). Уровень статистической значимости был принят $p = 0.05$. На диаграммах поставлены интервалы относительной погрешности, полученной для каждого из параметров внутри диапазона возрастов $\Delta X = E/X$, где $E = \Sigma(\pm E)/2$ — среднее значение доверительного интервала для измеренного значения, X — медианное значение измеренной величины. Поскольку доверительные интервалы различались для возрастов, на диаграмме указано максимальное значение относительной погрешности внутри всего возрастного диапазона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При сравнении параметров глаза в онтогенезе нет четко прослеживаемой зависимости размеров глаза от веса птицы. Зависимость имеет место только от возраста. При постановке эксперимента нами предполагалось, что при равных стартовых условиях развитие глаза будет иметь различия между повседневным освещением светодиодным светильником с преобладающей желтой компонентой спектра и лампой накаливания с преобладающей красной компонентой спектра.

На рис. 3 представлены результаты ультразвукового измерения структурных элементов глаза перепела в развитии от рождения (10 сут) до полного наступления зрелости (45 сут).

Основным показателем состояния глаза является размер его переднезадней оси (ПЗО). На *a*

можно видеть рост этого показателя у обеих групп птиц. Так, у группы “желтого фильтра” этот показатель соответствует 5.85 мм для птенцов 10-суточного развития и затем 6.45 мм для 20-суточного развития. У группы “ламп накаливания” значения оказываются ниже в среднем на 15%: 6.58 мм для птенцов 14 сут и 7.00 мм для 24 сут развития. Условные линии роста, показанные на диаграмме (*a*), являются линейной аппроксимацией и наглядно отображают постоянную разницу в величине ПЗО (15%) для обеих групп. Эта закономерность прослеживается в эксперименте для всех возрастов. Учитывая то, что лампа накаливания имеет преобладающую красную компоненту спектра, можно предположить, что в условиях ее повседневного использования развитие глаза птенца перепела имеет тенденцию к миопическим изменениям, о чем свидетельствует удлинение переднезадней оси глаза. Это согласуется с ранее полученными данными (Сигаева и др., 2015; Зак и др., 2015), которые свидетельствуют о том, что развитие глаз у детенышей разных видов животных (обезьян, цыплят) в случае красного повседневного освещения происходит в сторону миопизации.

Не менее важным параметром развития глаза является его сферичность. Величина этого параметра, измеренного ультразвуковым методом, варьируется от 0.71 до 0.74 отн. ед. для желтого освещения и от 0.68 до 0.77 отн. ед. — для лампы накаливания (*b*). Нужно отметить, что глаз перепела в норме имеет форму чечевицевого зерна (рис. 2). Измерения показывают, что в случае содержания птиц при повседневном использовании лампы накаливания форма глаза становится более сферичной. Это, предположительно, может являться критерием развития близорукости у перепела. Для птиц, содержащихся при использовании желтого светофильтра, рост глаза идет соответственно возрасту без изменения формы.

Также был измерен осевой размер стекловидного тела. Его величина варьируется в диапазоне от 3.05 до 4.23 мм для желтого освещения; от 3.75 до 4.60 мм — для лампы накаливания (рис. 3, *в*). В обоих случаях происходит рост параметра, что естественным образом вносит свой вклад в рост величины ПЗО. Однако можно отметить, что тенденция роста стекловидного тела вдоль оптической оси, в зависимости от условий, имеет некоторую разницу в скорости увеличения. Для развития глаза при лампе накаливания характерен более пологий рост. Это сопровождается неизменяющейся величиной сферичности, т.е. глаз растет в этом случае, пропорционально увеличиваясь в размерах за счет стекловидного тела без его деформации в сторону удлинения по оптической оси.

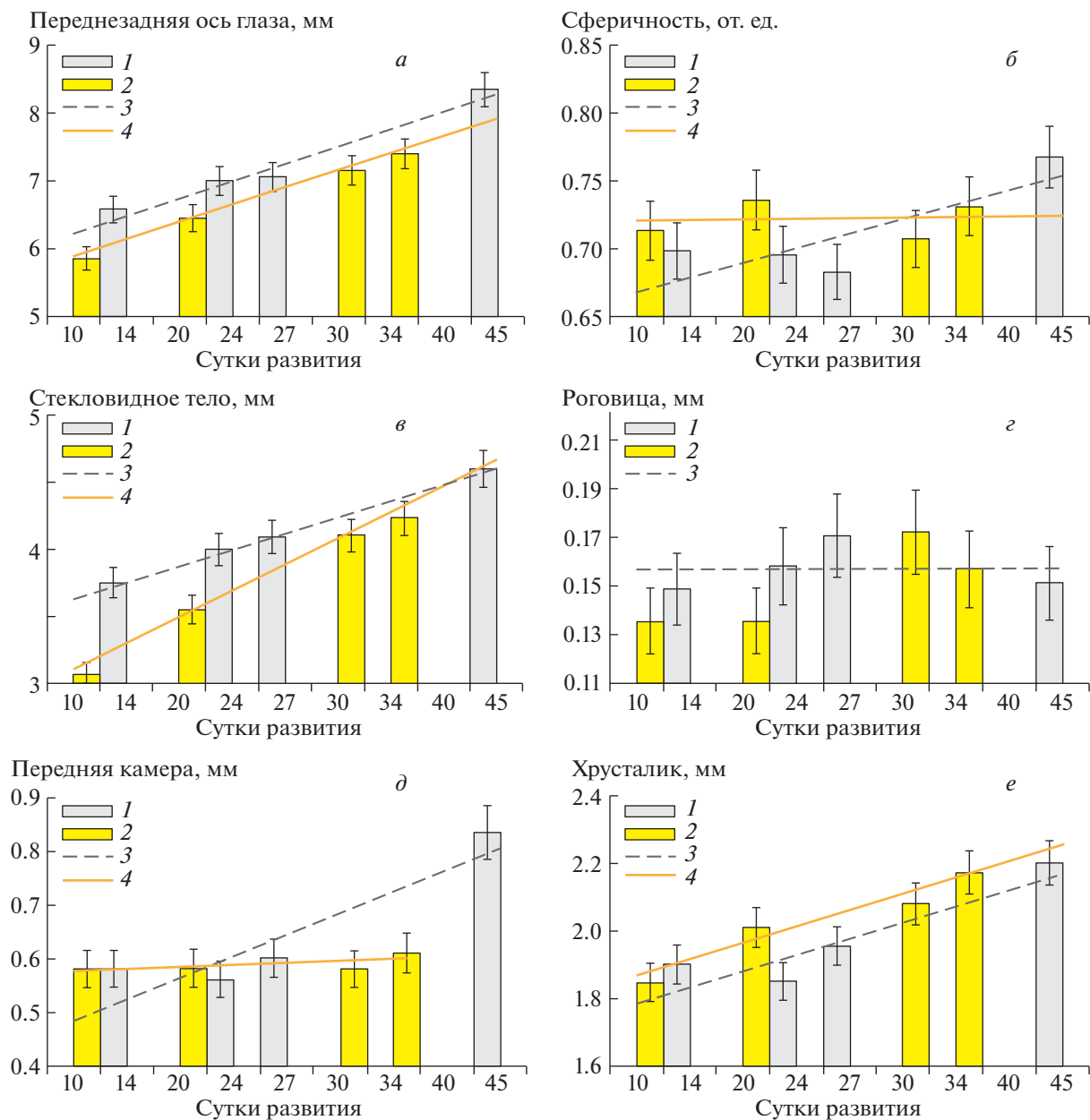


Рис. 3. Зависимость размеров структурных элементов глаза от возраста для перепела *Coturnix japonica*:

а — переднезадняя ось; б — сферичность; в — стекловидное тело; г — роговица; д — передняя камера; е — хрусталик, измеренный методом ультразвуковой микроскопии вдоль оптической оси. 1 — группа “лампы накаливания”, 2 — группа “желтого фильтра”, 3 и 4 — соответствующие линии тренда.

Важными компонентами оптической системы глаза являются также роговица, передняя камера и хрусталик. Толщина роговицы при измерениях варьировалась от 0.14 до 0.17 мм для желтого освещения; от 0.15 до 0.17 мм — для лампы накаливания (рис. 3, г). Тенденция к росту этого параметра внутри всего диапазона возрастов отсутствует для группы “лампы накаливания” или совсем незначительная для группы “желтого фильтра”. Можно отметить некоторое увеличение толщины роговицы для обеих групп для возрастов 30–34 сут.

Это, возможно, связано с накоплением влияния “красного” света к этому возрасту у птиц и его влиянием на выработку коллагена в структурах глаза с последующим торможением этого процесса в более зрелом возрасте (Агайџо et al., 2014). Если стимуляция роста коллагена напрямую связана с утолщением роговицы, тогда максимум этого параметра должен достигаться быстрее для группы “лампы накаливая” по сравнению с группой “желтого фильтра”, поскольку доза “красного” света в этом случае оказывается больше.

(рис. 1). Похожую тенденцию мы наблюдали в нашем эксперименте в пределах ошибки измерения методом ультразвуковой микроскопии и разброса значений внутри выборки для каждого возраста (рис. 3, з).

Средний размер передней камеры для птенцов (10–34 сут) составил 0.6 ± 0.02 мм для желтого света и 0.58 ± 0.02 мм — для лампы накаливания (рис. 3, д). Исследования, проведенные нами с более взрослыми птицами (45 + сут), содержащимися при лампе накаливания, показали существенное увеличение размера передней камеры по мере взросления до 0.77 мм у птиц возрастом 65 сут и 0.9 мм у птицы возрастом 100 сут. Возможно, рост свидетельствует о пролонгированном влиянии полученной дозы света красного диапазона на развитие близорукости, или же он является естественным для данного вида животных.

Толщина хрусталика при измерениях соответствовала диапазону от 1.85 до 2.17 мм для желтого освещения; от 1.9 до 2.2 мм — для лампы накаливания (рис. 3, е). В обоих случаях параметр имеет тенденцию к равномерному росту внутри всего диапазона возрастов с разницей в 5% между группами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По имеющимся в литературе данным в современном мире развитие детской близорукости приобрело скачкообразный массовый характер. Именно поэтому одним из актуальных направлений исследования механизмов близорукости у детей является исследование зависимости ее формирования от спектрального состава искусственного освещения.

Развитие структур глаза в условиях повседневной освещенности источниками разного спектра было исследовано методом ультразвуковой микроскопии. На живой модели японского перепела были получены данные о размерах переднезадней оси глаза, роговицы, передней камеры, хрусталика, стекловидного тела и сферичности в зависимости от возраста птенцов, содержащихся при повседневном освещении лампой накаливания и светодиодным светильником с желтым светофильтром. Было показано, что наличие в спектре красной составляющей, характерной для лампы накаливания, приводит к росту переднезадней оси глаза, взаимосвязанным изменениям геометрических параметров других его структурных элементов (хрусталика, передней камеры) и некоторой деформации стекловидного тела. Основываясь на полученных данных, можно предположить, что при ежедневном использовании лампы накаливания происходит развитие глаза в сторону близорукости. Поскольку данный вид освещения

по-прежнему имеет широкое распространение, вопрос о формировании и профилактике детской близорукости остается актуальным. Проблема усугубляется современным образом жизни и, бесспорно, требует более тщательного подхода к обеспечению безопасных спектральных характеристик источников искусственного повседневного освещения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Донцов А.Е., Воробьев И.А., Зольникова И.В., Погодина Л.С., Поташников Д.М., Сережников Н.Б., Зак П.П. Фотобиомодулирующее действие низкодозового светодиодного облучения синего диапазона (450 нм) на митохондриальную активность. *Сенсорные системы*. 2017. Т. 31. № 4. С. 312–321.
- Зак П.П., Островский М.А. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков. *Светотехника*. 2012. № 3. С. 4–6.
- Зак П.П. Основания ограничения цветовой температуры светодиодного освещения в образовательных, дошкольных и лечебных учреждениях. М.: ООО “Мессе Франкфурт РУС” В кн.: Материалы IX Международного Форума по светодиодным технологиям 9–11 ноября 2015. 2015. С. 28–32.
- Зак П.П., Сережников Н.Б., Погодина Л.С., Трофимова Н.Н., Гурьева Т.С., Дадашева О.А. Фотоиндуцированные изменения субклеточных структур ретиального пигментного эпителия перепела *Coturnix japonica*. *Биохимия*. 2015. Т. 80. № 6. С. 931–936.
- Зак П.П., Петронюк Ю.С., Храмцова Е.А., Трофимова Н.Н., Мисяков А.Н., Гурьева Т.С., Дадашева О.А., Левин В.М. Акустико-микроскопическое исследование возрастных изменений структур глаза японского перепела *Coturnix japonica*. *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2019. Т. 4. № 2. С. 233–236.
- Карпенко И.В., Тимаков В.В. Проблемы зрения у школьников. *Медицинская сестра*. 2016. № 1. С. 24–25.
- Пашков Б.А. *Биофизические основы квантовой медицины. Методическое пособие к курсам по квантовой медицине*. М.: ЗАО “МИЛТА-ПКПГИТ”, 2004. 116 с.
- Петронюк Ю.С., Трофимова Н.Н., Зак П.П., Храмцова Е.А., Андрюхина О.М., Андрюхина А.С., Рябцева А.А., Гурьева Т.С., Медникова Е.И., Титов С.А., Левин В.М. Исследование глазных патологий на биомодели японского перепела *Coturnix japonica*. *Химическая физика*. Т. 41. № 2. 2022. С. 27–33.
- Сигаева А.О., Сережников Н.Б., Погодина Л.С., Трофимова Н.Н., Зак П.П. Возрастные изменения сосудистой оболочки глаза экспериментальной животной модели: японский перепел *Coturnix japonica*. Материалы Российского общенационального

- офтальмологического форума. М.: “Апрель”. 2015. Т. 2. С. 906–910.
- Araújo A.R., Piancastelli A.C.C., Pinotti M. Effects of low-power light therapy on wound healing: LASER x LED. *An. Bras.Dermatol.* 2014. V. 89. N 4. P. 616–623.
- Foster F.S., Zhang M.Y., Duckett A.S., Cucevic V., Pavlin Ch.J. In vivo imaging of embryonic development in the mouse eye by ultrasound biomicroscopy. *Invest. Ophthalmol.Vis.Sci.* 2003. N 44. P. 2361–2366. <https://doi.org/10.1167/iops.02-0911>
- Coleman D.J., Silverman R.H., Chabi A., Mark J Rondeau, K Kirk Shung, Jon Cannata, Harvey Lincoff. High resolution ultrasonic imaging of the posterior segment. *Ophthalmology.* 2004. V. 111. N 7. P. 1344–51.
- Hill C.R., Bamber J.C., ter Haar G.R. Physical Principles of Medical Ultrasonics. John Wiley & Sons, Ltd. 2004. 528 p. <https://doi.org/10.1002/0470093978>
- Llombart C., Nacher V., Ramos D., Luppó M., Carretero A., Navarro M., Melgarejo V., Armendol C. Morphological characterization of pecteneal hyalocytes in the developing quail retina. *J Anat.* 2009. N 3. P. 280–291. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2009.01117.x>
- Nakamura Y., Kusano K., Nakamura K., Kobayashi K., Hozumi N., Saijo Y., Ohe T. A new diagnostic feasibility for cardiomyopathy utilizing acoustic microscopy. *World Journal of Cardiovascular Diseases.* 2013. N 3. P. 22–30. <https://doi.org/10.4236/wjcd.2013.31006>
- Pavlin C., Easterbrook M., Hurwitz J., Harasiewicz K., Foster F.S. *Am. J. Ophthalmol.* 1993. V. 116. P. 854–857. [https://doi.org/10.1016/s0002-9394\(14\)73207-6](https://doi.org/10.1016/s0002-9394(14)73207-6)
- Pavlin C.J., Harasiewicz K., Sherar M.D. Clinical use of ultrasound biomicroscopy. *Ophthalmology.* 1991. V. 98. N 3. P. 287–295.
- Presby J.A., Scott E.M., Norman K.N. Hoppes Sh.M., Tizard I. Normative ocular data for juvenile and adult Japanese quail (*Coturnix japonica*). *Veterinary Ophthalmology.* 2020. N 23. P. 526–533.
- Wisely C.E., Sayed J.A., Tamez H., Zelinka Ch., Abdel-Rahman M.H., Fischer A.J., Cebulla C.M. The chick eye in vision research: an excellent model for the study of ocular disease. *Prog Retin Eye Res.* 2017. V. 61. P. 72–97. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2017.06.004>

Influence of spectral components of daily lighting on eye structures formation for japanese quail *coturnix japonica*

N. N. Trofimova^{a,*}, Y. S. Petronyuk^a, T. S. Guryeva^b, E. I. Mednikova^b, and P. P. Zak^a

^a Federal State Budgetary Institution of Science N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences
119991 Moscow, Kosygin str., 4, Russia

^b Federal State Budgetary Institution of Science State Scientific Center of the Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences
123007 Moscow, Khoroshevskoe highway, 76A, Russia

^{*}E-mail: ntrofimova@mail.ru

The dimensions of a growing child's eye are quickly adjusted to the focusing of the dominant spectral band of illumination. It is the prevailing type of lighting that plays an important role in the formation of the eyeball in childhood. Everyday use of lamps with a predominance of the red component in the spectral composition can lead to elongation of the eye (myopia) in the most crucial period of development. These changes may be irreversible, among other things. In the paper various parameters of the eyes of quail chicks were measured at different age points during the maturation period. The method of acoustic microscopy was used for the study. Measurements were carried out for two groups of birds. The following were taken as everyday lighting: incandescent lamp in the first case, and LED lamp with a dominant spectral band of 525–700 nm in the second case. The obtained results show the disadvantages of incandescent lamp using as everyday lighting during the formation of the adolescent's eyeball.

Key words: eye, children's myopia, everyday lighting, Japanese quail, acoustic microscopy

REFERENCES

- Araújo A.R., Piancastelli A.C.C., Pinotti M. Effects of low-power light therapy on wound healing: LASER x LED. *An. Bras.Dermatol.* 2014. V. 89. N 4. P. 616–623.
- Coleman D.J., Silverman R.H., Chabi A., Mark J Rondeau, K Kirk Shung, Jon Cannata, Harvey Lincoff. High resolution ultrasonic imaging of the posterior segment. *Ophthalmology.* 2004. V. 111. N 7. P. 1344–51.
- Dontsov A.E., Vorobjev I.A., Zolnikova I.V., Pogodina L.S., Potashnikova D.M., Seryoznikova N.B., Zack P.P. Photobiomodulating effect of low-dose led blue range (450 nm) radiation on mitochondrial activity. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2017. V. 31 (4). P. 312–321 (in Russian).
- Foster F.S., Zhang M.Y., Duckett A.S., Cucevic V., Pavlin Ch.J. In vivo imaging of embryonic development in the mouse eye by ultrasound biomicroscopy.

- Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2003. N 44. P. 2361–2366.
<https://doi.org/10.1167/iows.02-0911>.
- Hill C.R., Bamber J.C., ter Haar G. R. Physical Principles of Medical Ultrasonics. *John Wiley & Sons, Ltd.* 2004. 528 p.
<https://doi.org/10.1002/0470093978>
- Llombart C., Nacher V., Ramos D., Luppo M., Carretero A., Navarro M., Melgarejo V., Armengol C. Morphological characterization of pecteneal hyalocytes in the developing quail retina. *J Anat.* 2009. N 3. P. 280–291.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2009.01117.x>.
- Karpenko I.V., Timakov V.V. Vision problems in school-children. *Meditsinskaya sestra* [Medical nurse]. 2016. № 1. P. 24–25 (in Russian).
- Nakamura Y., Kusano K., Nakamura K., Kobayashi K., Hozumi N., Saijo Y., Ohe T. A new diagnostic feasibility for cardiomyopathy utilizing acoustic microscopy. *World Journal of Cardiovascular Diseases.* 2013. N 3. P. 22–30.
<https://doi.org/10.4236/wjcd.2013.31006>.
- Pashkov B.A. Biofizicheskie osnovy kvantovoj mediciny. [Biophysical foundations of quantum medicine] *Metodicheskoe posobie k kursam po kvantovoj medicine* [Methodological guide to courses in quantum medicine]. Moscow: ZAO “MILTA-PKPGIT”. 2004. P. 1–116 (in Russian).
- Pavlin C., Easterbrook M., Hurwitz J., Harasiewicz K., Foster F.S. Ultrasound Biomicroscopy in the Assessment of Anterior Scleral Disease. *Am. J. Ophthalmol.* 1993. V. 116. P. 854–857.
[https://doi.org/10.1016/s0002-9394\(14\)73207-6](https://doi.org/10.1016/s0002-9394(14)73207-6).
- Pavlin C.J., Harasiewicz K., Sherar M.D., Foster F.S. Clinical use of ultrasound biomicroscopy. *Ophthalmology.* 1991. V. 98. N 3. P. 287–295.
[https://doi.org/10.1016/s0161-6420\(91\)32298-x](https://doi.org/10.1016/s0161-6420(91)32298-x).
- Petronyuk Yu.S., Trofimova N.N., Zak P.P., Khramtsova E.A., Andryukhina O.M., Andryukhina A.S., Ryabtseva A.A., Guryeva T.S., Mednikova E.I., Titov S.A., Levin V.M. Study of Eye Pathologies in the Japanese Quail Bio-model *Coturnix japonica*. *Russian Journal of Physical Chemistry B.* 2022. V. 1616 (1). P. 97–102.
<https://doi.org/10.1134/S1990793122010249>
- Presby J.A., Scott E.M., Norman K.N. Hoppes Sh.M., Tizard I. Normative ocular data for juvenile and adult Japanese quail (*Coturnix japonica*). *Veterinary Ophthalmology.* 2020. N 23. P. 526–533.
- Sigaeva A.O., Serezhnikova N.B., Pogodina L.S., Trofimova N.N., Zak P.P. Vozrastnye izmeneniya sosudistoj obolochki glaza jeksperimental'noj zhivotnoj modeli: japonskij perepel *Coturnix japonica* [Age-related changes in the vascular membrane of the eye of an experimental animal model: Japanese quail *Coturnix japonica*]. *Materialy Rossijskogo obshhenacional'nogo oftal'mologicheskogo foruma* [Materials of the Russian National Ophthalmological Forum]. Moscow: “Aprel”. 2015. V. 2. P. 906–910 (in Russian).
- Wisely C.E., Sayed J.A., Tamez H., Zelinka Ch., Abdel-Rahman M.H., Fischer A.J., Cebulla C.M. The chick eye in vision research: an excellent model for the study of ocular disease. *Prog Retin Eye Res.* 2017. V. 61. P. 72–97.
<https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2017.06.004>.
- Zak P.P. Osnovaniya ogranicheniya cvetovoj temperatury svetodiodnogo osveshheniya v obrazovatel'nyh, doskol'nyh i lechebnyh uchrezhdenijah [Bases for limiting the color temperature of LED lighting in educational, preschool and medical institutions] *Materialy IX Mezhdunarodnogo Forumy po svetodiodnym tehnologijam* [Proc. IX Intern. Forum on LED Technol.] Moscow: OOO “Messe Frankfurt RUS”, November 9–11, 2015. P. 28–32 (in Russian).
- Zak P.P., Ostrovsky M.A. Potential danger of light emitting diode illumination to the eye, in children and teenagers. *Light & Engineering.* 2012. V. 20 (3). P. 5–8.
- Zak P.P., Petronjuk Ju.S., Hramcova E.A., Trofimova N.N., Misjakov A.N., Gur'eva T.S., Dadasheva O.A., Levin V.M. Akustiko-mikroskopicheskoe issledovanie vozrastnyh izmenenij struktur glaza japonskogo perepela *Coturnix japonica* [Acoustic-microscopic study of age-related changes in the eye structures of the Japanese quail *Coturnix japonica*] *Aktual'nye voprosy biologicheskoy fiziki i himii* [Topical issues of biological physics and chemistry]. 2019. V. 4 (2). P. 233–236 (in Russian).
- Zak P.P., Serezhnikova N.B., Trofimova N.N., Pogodina L.S., Gur'eva T.S., Dadasheva O.A. Photoinduced changes in subcellular structures of the retinal pigment epithelium from the japanese quail *Coturnix japonica*. *Biochemistry.* 2015. V. 80 (6). P. 785–789.

ПРОТИВОРЕЧИЯ В ДАННЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ СЛУХОВОЙ СИСТЕМЫ БАБОЧЕК – СОВОК (LEPIDOPTERA, NOCTUIDAE)

© 2022 г. Д. Н. Лапшин^{1,*}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН
127051 Москва, Б. Каретный переулок, д. 19, Россия

*E-mail: lapshin@iitp.ru

Поступила в редакцию 25.03.2022 г.

После доработки 19.04.2022 г.

Принята к публикации 26.04.2022 г.

Бабочек-совок *Agrochola macilenta* Hbn. и *Scoliopteryx libatrix* L. в условиях закрепленного полета тестировали сериями акустических пульсов, сходными с эхолокационными сигналами летучих мышей. Исследовали изменения курсового аэродинамического усилия летящей бабочки в зависимости от амплитуды и частоты заполнения акустических стимулов в частотном диапазоне 10–140 кГц. Усредненные частотно-пороговые графики представителей обоих видов по форме были сходными с аудиограммами слуховых рецепторов тимпанальных органов совков, но значения порогов, зарегистрированных в поведенческих тестах, были ниже порогов слуховых рецепторов тимпанальных органов в среднем на 35 дБ. Обсуждаются возможные механизмы регуляции акустической чувствительности интактных совков и влияние на получаемые результаты методов регистрации двигательной активности подопытных бабочек.

Ключевые слова: Noctuidae, акустическое восприятие, частотная настройка, тимпанальный орган, полет

DOI: 10.31857/S0235009222030040

Измерение порога чувствительности животного к внешним раздражителям обычно реализуют, устанавливая корреляцию между тестовыми стимулами и изменениями, наблюдаемыми либо в поведении интактного животного, либо в активности его нейронов. Эффективность обоих методов во многом определяется степенью соответствия используемых стимулов параметрам “ключевых” сигналов, с наибольшей вероятностью вызывающих определенный тип ответной реакции. Эксперименты осложняются необходимостью учитывать влияние гормонального статуса животного, физических условий (температуры, влажности, времени суток) и пространственной обстановки, в которой проводится тестирование.

Нейронные ответы, регистрируемые на уровне периферической части сенсорного пути, как правило, отличаются высокой повторяемостью. Это облегчает исследователям определение тех диапазонов интенсивности стимулов, в которых наблюдаются резкое нарастание ответной нейронной активности и последующий выбор на основе этих данных критериев порога реакции.

В теории пороги реакций, измеренные в ходе физиологического и поведенческого тестирования, должны давать согласованную картину. Однако в реальности это наблюдается далеко не всегда. В качестве примера такого очевидного несоответствия можно привести результаты исследования слуховой системы ночных чешуекрылых – совков (Noctuidae).

Совки способны воспринимать ультразвуки при помощи пары тимпанальных органов (ТО), расположенных симметрично на метотораксе. Чувствительными элементами ТО являются два слуховых рецептора (A_1 и A_2), реагирующие на колебания тимпанальной мембраны.

В процессе исследования слуха бабочек были разработаны методики, позволявшие отдельно регистрировать спайковую активность обоих слуховых рецепторов и измерять их частотно-пороговые характеристики (аудиограммы). При общем сходстве формы аудиограмм пороги клеток A_2 оказались примерно на 20 дБ выше по сравнению с порогами клетки A_1 (Suga, 1961; Surlykke,

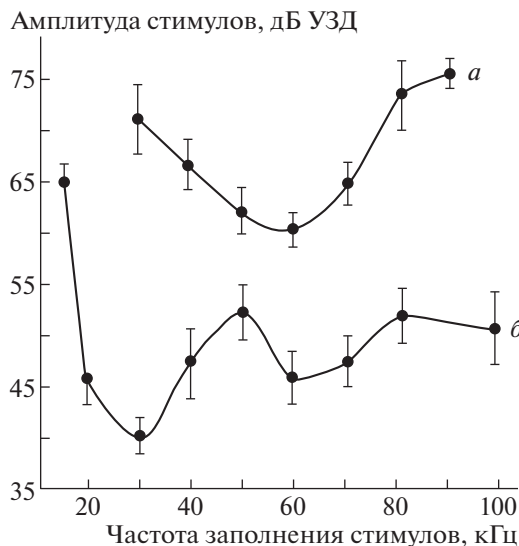


Рис. 1. Частотно-пороговые характеристики совок *Blepharita satura* Schiff., измеренные в поведенческих (а) и электрофизиологических экспериментах (б). Указаны ошибки средних значений (Fyodorova, Lapshin, 1990).

Miller, 1982). Был сделан вывод, что форма аудиограмм рецепторов определяется механикой тимпанального органа, в частности, резонансными свойствами тимпанальной мембраны (Adams, 1972; Schiolten et al., 1981).

С учетом простой морфологии периферической части слуховой системы совок получила развитие теория, согласно которой возбуждение каждого из двух слуховых рецепторов инициирует специфические формы реакций бабочек: при сравнительно слабых сигналах возбуждается более чувствительная клетка A_1 , и бабочка стремится улететь от источника звука, тогда как в случаях превышения сигналом порога менее чувствительной клетки A_2 запускается режим хаотического полета, либо бабочка прекращает полет и падает в траву (Roeder, 1962; 1967). Все эти особенности поведения совок хорошо укладывались в картину их защитного поведения при нападении летучих мышей, использующих в процессе охоты на насекомых ультразвуковую эхолокацию.

В то же время попытки измерить характеристики слуха бабочек с использованием поведенческих тестов не давали однозначных результатов (Madsen, Miller, 1987). Первые стабильные реакции были получены в условиях частично закрепленного полета подопытных насекомых (Fyodorova, Lapshin, 1990). В этих опытах бабочку приклеивали к тонкой нити, другой (верхний) конец которой был закреплен на электромеханическом датчике. Регистрирующая система позволяла оценить интенсивность маневров летавшего насекомого в ответ на акустическую стимуляцию.

Параллельно с поведенческими опытами проводились электрофизиологические исследования рецепторной чувствительности того же вида совок. Однако полученные результаты поведенческих и электрофизиологических опытов не совпали ни по форме аудиограмм, ни по пороговым уровням.

Сравнительно высокие поведенческие пороги, полученные в том исследовании (рис. 1, а), можно было объяснить тем, что электромеханическая система регистрировала энергичные маневры бабочек, инициируемые в ЦНС высокочастотными рецепторными клетками A_2 , в то время как электрофизиологические измерения (рис. 1, б) отражали характеристики более чувствительных рецепторов A_1 . Однако оставался невыясненным вопрос о причинах несовпадения формы аудиограмм.

Известно, что акустическая стимуляция вызывает у совок изменение натяжения тимпанальной мембраны за счет смещения окружающих ее структур (Callahan, Carlisle, 1972). На параметры слуховой системы бабочек должны также существенно влиять факторы, связанные с полетом. В частности, Пейн и соавт. (Payne et al., 1966) показали, что дирекциональная направленность ТО зависит от положения крыльев в момент восприятия звука. Весьма вероятно влияние переменного давления в тимпанальной полости, которое может возникать вследствие дыхания бабочки (тимпанальная полость связана с трахейной системой (Roeder, Treat, 1957)) или механической деформации торакса при маховых движениях. Ритмичное изменение воздушного давления под мембраной должно приводить к сдвигу основного резонанса ТО.

Экспериментально вопрос о степени стабильности частотной настройки ТО удалось решить при помощи методики, в которой акустическую стимуляцию осуществляли короткими ультразвуковыми импульсами, следовавшими в определенной фазе цикла взмаха крыльями подопытной бабочки (Лапшин, Воронцов, 2000). Перед опытом совок *Amphipyra pyramidea* L. приклеивали теплым воском к механическому датчику — измерителю усилий, которые возникали при попытках летящего насекомого совершать развороты в горизонтальной плоскости. Оказалось, что частотно-пороговая характеристика слуховой системы совок меняет форму в зависимости от фазы взмаха: при движении крыльев вниз до нижней точки основной оптимум аудиограммы расположен в области 20–30 кГц, но в процессе движения крыльев вверх этот оптимум смещается в высокочастотную область к 50–60 кГц (рис. 2). Общий уровень поведенческих порогов, зарегистрированных в этих опытах, примерно соответствовал данным электрофизиологических измерений. Однако ни-

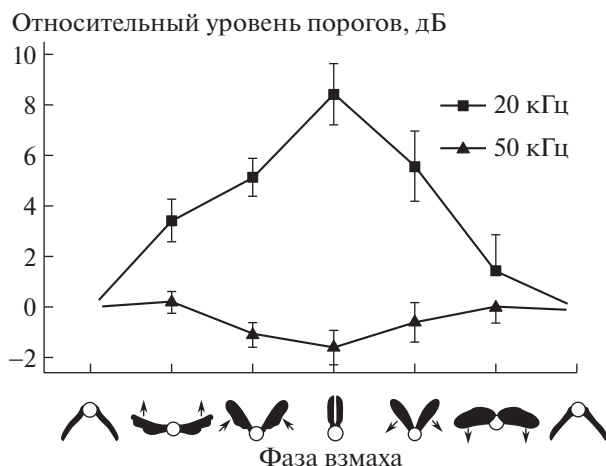


Рис. 2. Относительные уровни поведенческих порогов на частотах 20 и 50 кГц в зависимости от фазы взмаха в моменты восприятия акустических стимулов. По горизонтальной оси в условных единицах представлены последовательные фазы взмаха, которые характеризуются определенным положением крыльев и направлением их движения. Под горизонтальной осью схематично изображено положение крыльев бабочек в каждой фазе, стрелками указано направление их движения. По вертикальной оси — относительный сдвиг порогов реакций в дБ. Указаны ошибки средних значений (Лапшин, Воронцов, 2000).

же физиологических порогов сохранялась некоторая вероятность двигательных реакций на стимуляцию. Это обстоятельство усложняло измерение порогов и, по-видимому, и было одной из проблем в более ранних попытках провести подобные измерения.

Способность ночных бабочек перестраивать основной резонанс ТО позже была подтверждена Джеймсом Уиндмилом и соавт. (Windmill et al., 2006). В этой работе было показано, что при высоких уровнях акустических сигналов основная настройка ТО сдвигается в высокочастотную область.

Совки — акустически активные насекомые, способные не только издавать ультразвуковые щелчки, но и реагировать на эхо от собственных щелчков (Лапшин, 2005). В экспериментах с синхронизацией акустических стимулов с собственными щелчками бабочек эффекты частотных перестроек слуховой системы проявились значительно контрастнее (рис. 3). В этих опытах в качестве признака реакции на звук был использован эффект ответного учащения подопытной бабочкой эмиссии щелчков (Лапшин, Воронцов, 2005).

В процессе тестирования стимулами, синхронными со щелчками, были зарегистрированы очень низкие пороги реакций — порядка 11 дБ уровня звукового давления (УЗД). Эти результаты вошли в существенное противоречие с оценками

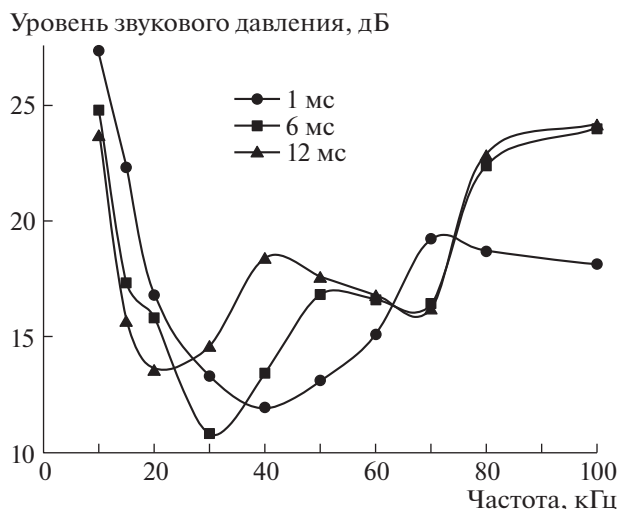


Рис. 3. Усредненные частотно-пороговые характеристики совка *Blepharita satura*, полученные при трех значениях задержек стимулов относительно собственных щелчков бабочек (обозначения приведены в верхней части рисунка). По горизонтальной оси — частота заполнения стимулирующих посылок, по вертикальной — порог реакций. Указаны ошибки средних (Лапшин, Воронцов, 2005).

пороговой чувствительности совков, полученными в электрофизиологических экспериментах (рис. 1). Позже выполненные измерения показали, что такую разницу нельзя объяснить температурными различиями при проведении экспериментов или влиянием времени суток (Лапшин, Воронцов, 2004). Можно было бы предположить, что собственный щелчок бабочки или определенный тип ее двигательной активности, предшествовавший тональному стимулу, способствовал снижению порогов чувствительности. Для решения этого вопроса надо было провести серию экспериментов, в которых ритм акустической стимуляции не зависел от поведения подопытных насекомых.

Цель данной работы — измерение минимальных поведенческих порогов совков на ультразвуковые импульсы, сходные по динамике следования с эхолокационными сигналами насекомоядных летучих мышей. В предварительной серии опытов было выяснено, что акустическая стимуляция инициирует у летящих совков усиление или сильные вариации аэродинамической тяги, поэтому в качестве основного признака реакций насекомых на звук были использованы изменения интенсивности их полета.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В экспериментах использовали совков *Agrochola macilenta* Hbn. и *Scoliopteryx libatrix* L., отловленных на пищевой аттрактант. С представ-

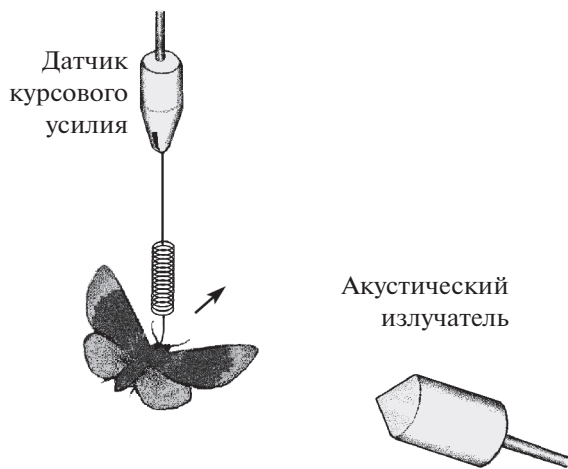


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: летящая бабочка укреплена на держателе датчика курсового аэродинамического усилия через амортизирующую пружину. Справа от бабочки установлен излучатель акустических стимулов.

вителями каждого вида проведено по восемь опытов, причем в каждом опыте использовали одну бабочку.

Перед началом эксперимента бабочку приклеивали за нотум разогретой канифольно-восковой смесью к мягкой пружине держателя механодатчика, позволявшего регистрировать изменения аэродинамического усилия летящего насекомого в курсовом направлении (рис. 4). На фоне вибрации от машущих крыльев пружинная подвеска уменьшала переменную механическую нагрузку на поверхность кутикулы в области приклейки. Через несколько часов после проведения операции приклейки, клеящая смесь при небольшом усилии отслаивалась от кутикулы подопытного насекомого. После проведения экспериментов бабочек освобождали от приклейки и выпускали в естественную среду.

Исследовали двигательные реакции летевших бабочек в ответ на акустические стимулы, состоявшие из четырех серий тональных пульсов (рис. 5). Период следования серий — 0,4 с. Каждая серия содержала восемь пульсов длительностью 10 мс каждый с фронтами нарастания и спада 0,5 мс, период следования пульсов в серии 25 мс. Частоту синусоидального заполнения пульсов варьировали в ходе опыта в диапазоне от 10 до 140 кГц. Управление экспериментами осуществлялось под контролем авторской компьютерной программы. Всего было зарегистрировано 416 ответов бабочек на акустическую стимуляцию. После установки нового значения частоты заполнения пульсов тестирование начинали с подпороговых уровней. Общее количество предъявлений стимулов с подпороговым уровнем превышало 1500.

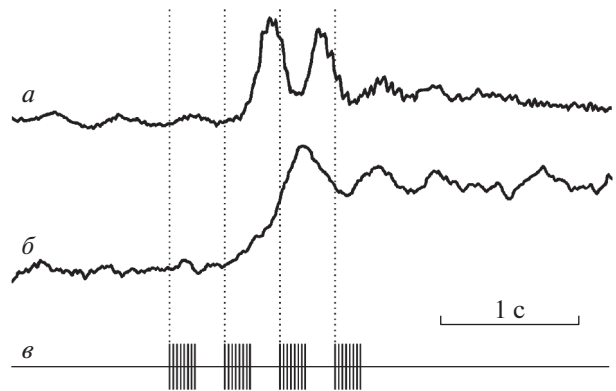


Рис. 5. Примеры осциллограмм двигательных реакций бабочек в ответ на акустическую стимуляцию: а — увеличение интенсивности полета во время действия второго цикла стимуляции и раскачивание в продольном направлении (*Agrochola macilenta*, 40 кГц, 10 дБ УЗД); б — увеличение интенсивности полета в начале второго цикла стимуляции (*Scoliopteryx libatrix*, 40 кГц, 16 дБ УЗД); в — черными прямоугольниками под осциллограммами обозначены тональные пульсы в составе стимулирующих серий.

За реакцию принимали отклонения сигнала механодатчика от базовой линии с амплитудой, в 2 и более раза превышавшие сходные по форме спонтанные колебания за предшествовавшие 4 с наблюдений. Основная схема определения порога была следующая: при уровне стимула, который принимали как подпороговый (на 2 дБ ниже порога), в четырех последовательных предъявлениях стимулов только 1 раз могла наблюдаться реакция; в двух последующих предъявлениях, но уже при пороговом уровне стимула, реакция должна была повториться последовательно 2 раза. В сомнительных случаях в зависимости от конкретной ситуации либо увеличивали период наблюдения за фоновой активностью, либо повторяли предъявления с околопороговыми уровнями. Такая схема тестирования была выбрана для снижения вероятности привыкания подопытного насекомого к надпороговой акустической стимуляции.

В конце опыта на то место, где до этого располагался грудной отдел подопытного насекомого, помещали измерительный конденсаторный микрофон и проводили калибровку стимулирующего тракта при разных частотах заполнения тональных посылок. В процессе калибровки использовали измеритель акустического давления B&K 2235 (Brüel & Kjær, Дания) совместно с 1/4" микрофоном B&K 4135 при измерениях в частотном диапазоне 10–70 кГц и 1/8" микрофоном 40DP (G.R.A.S., Дания) при измерениях в пределах диапазона 70–140 кГц. Для контроля соответствия показаний измерителя уровня принятому стандарту (0 дБ соответствует акустическому дав-

лению 2×10^{-5} Па) использовали калибратор 05000 MMF (VEB Metra Meß Frequenztechnik).

Поскольку в опытах предполагалось использовать акустические стимулы с амплитудой, заведомо меньшей нижней границы чувствительности измерительных микрофонов, были предприняты специальные меры для снижения влияния неконтролируемых помех в электрическом тракте стимулирующего канала. С этой целью на выходе усилителя мощности, питавшего акустический излучатель, был установлен управляемый от компьютера резистивный аттенюатор. Ослабление сигнала на выходе аттенюатора составляло –50 дБ или 1:316. Аттенюатор программно активировался при работе в диапазоне амплитуд стимулов 0–49 дБ УЗД. При этом на входе акустического излучателя уменьшался не только сам сигнал, но и все виды шумов, которые потенциально могли появиться в тракте формирования стимула из-за воздействия на аппаратуру электрических помех различного происхождения. Контроль качества электрического сигнала на выходе формирователя стимулирующих пульсов при этом не представлял особых трудностей.

В качестве источника стимулов был использован конденсаторный акустический излучатель, изготовленный в лаборатории. Излучающим элементом служила мембрана диаметром 3 см из металлизированной лавсановой пленки толщиной 35 мкм. На мембрану поступало поляризующее напряжение +180 В в сумме с управляющим синусоидальным сигналом. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики излучателя в диапазоне 10–140 кГц составляла порядка 14 дБ. Поправки на неравномерность частотной характеристики стимулирующего тракта в ходе опыта вносились автоматически при каждом изменении частоты заполнения стимула.

Так как совки в ходе экспериментов могли издавать собственные щелчки, было важно уменьшить уровень эха от окружающих предметов в сторону подопытной бабочки. Для этого экспериментальную зону на расстоянии ~70 см от бабочки экранировали поролоновыми листами с волнистой поверхностью, а мембрана акустического излучателя была закрыта конусом из полупрозрачной для акустических волн бумаги, ослаблявшей отражение звука от мембраны в сторону подопытного насекомого.

Ранее было показано, что индивидуальные пороги реакций совок на акустические стимулы постепенно снижались от экземпляра к экземпляру в течение августа (Лапшин, Воронцов, 2000). С учетом этого обстоятельства экспериментальные работы были запланированы на сентябрь и частично октябрь, когда можно было ожидать проявления максимальной акустической чувствительности у подопытных бабочек.

Эксперименты проводили в лабораторных условиях при температуре воздуха 18–20°C. Место проведения экспериментов – биостанция ИБР РАН “Кропотово” (105 км к юго-востоку от Москвы).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Двигательные реакции бабочек на акустическую стимуляцию

Изменения в активности подопытных бабочек на фоне акустической стимуляции были выражены в попытках маневрировать в курсовом направлении (53%; рис. 5, а) или в плавном увеличении аэродинамического усилия (31%; рис. 5, б), а также в сочетании обоих типов реакций. Более редкие формы ответов включали возбуждение собственной акустической эмиссии (генерацию ультразвуковых щелчков, 6%) и прекращение полета (10%).

При действии стимуляции с надпороговой амплитудой наиболее характерным было развитие ответной реакции в интервале с середины первой серии пульсов до конца второй серии. В 50% случаев реакция развивалась на фоне действия первой серии пульсов, в 35% – на фоне второй серии и 11 и 4% на фоне действия третьей и четвертой серий соответственно ($N = 416$). Вероятность регистрации поведенческого ответа увеличивалась по мере приближения уровня стимуляции к порогу со стороны больших значений. Статистику этого явления подробно не исследовали из-за ограниченных летных ресурсов подопытных бабочек.

Частотно-пороговые характеристики

Усредненные частотно-пороговые графики представителей обоих видов по форме были сходными (рис. 6). Локальный оптимум в диапазоне 15–25 кГц присутствовал на всех индивидуальных аудиограммах. В диапазоне 40–60 кГц еще один широкий минимум содержали шесть из восьми аудиограмм в каждой видовой группе. В области минимума графиков в диапазоне 50–70 кГц усредненные пороги составляли в группе *S. libatrix* 11 дБ УЗД, а в группе *A. macilenta* – 12 дБ УЗД.

ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки минимальных порогов поведенческих реакций совок (рис. 6) в целом совпали с полученными ранее данными опытов, в которых использовали стимуляцию, синхронную с собственными щелчками бабочек (рис. 3: 6 мс). Форма поведенческих графиков в пределах 10–60 кГц напоминала “сглаженный” вариант аудиограммы

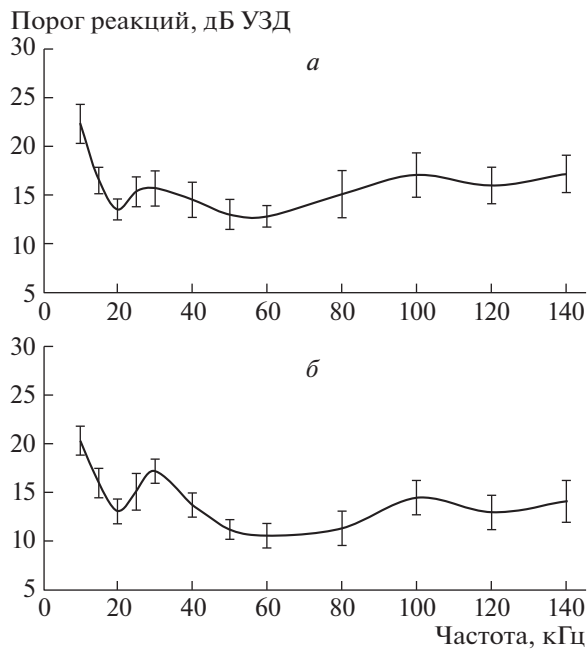


Рис. 6. Усредненные поведенческие частотно-пороговые характеристики совок двух видов: *a* — *Agrochola macilenta*, *б* — *Scoliopteryx libatrix*. Указаны ошибки средних.

рецептора A_1 тимпанального органа совок (например, при сравнении графика на рис. 1, б и двух графиков рис. 6). Так как моменты предъявления тональных стимулов определялись программно и не зависели от двигательной активности насекомого, можно сделать вывод, что поведенческие аудиограммы формировались как результат усреднения нескольких состояний слуховой системы, последовательно сменявшихся в такт с крыловыми взмахами. Следовало учитывать, что при каждом взмахе крыльями изменялась не только частотная характеристика ТО, но и пространственная ориентация диаграмм направленности слуховой системы (Payne et al., 1966). По этой причине внешние звуки неизбежно получали дополнительную амплитудную модуляцию, также синхронную с маховыми движениями насекомого. На настоящий момент затруднительно дать ответ, как последнее обстоятельство отразилось на восприятии акустических стимулов.

В диапазоне от 80 кГц и выше “сглаживанию” поведенческих аудиограмм дополнительно мог способствовать механизм настройки на воспринимаемый сигнал. Признаки активности такого механизма ранее были обнаружены при исследовании реакций слуховых интернейронов совок в околопороговой области (Лапшин, Воронцов, 2004).

На рис. 7 приведена диаграмма, качественно характеризующая вероятность появления двига-

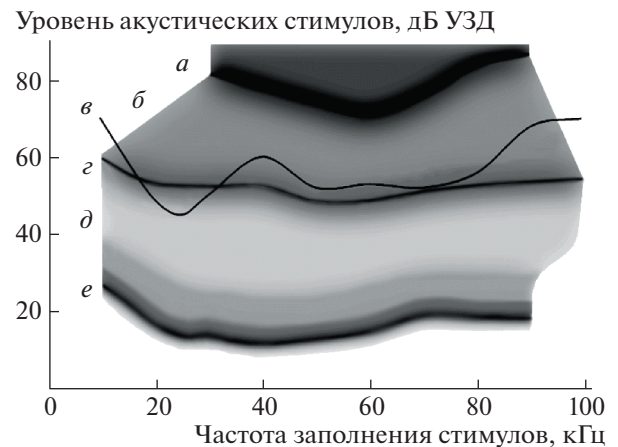


Рис. 7. Диаграмма, отображающая систему областей проявления поведенческих реакций совок на звуковые стимулы в координатах “частота” (горизонтальная ось) и “амплитуда акустических стимулов” (вертикальная ось). Плотностью серого тона на диаграмме обозначена вероятность ответных реакций: светло-серый цвет закраски областей диаграммы соответствует малой вероятности ответов, темно-серый цвет — высокая вероятность ответов. Описание структурных элементов диаграммы, обозначенных на рисунке буквами, приведено в тексте статьи.

тельных ответов совок в зависимости от амплитуды и частоты заполнения тональных стимулов. Если в этих координатах нанести данные измерений поведенческих порогов, полученные с использованием различных критериев реакций, то в результирующей картине будет наблюдаться “слоистая структура”. Рассмотрим отдельные “слои” диаграммы последовательно от больших амплитуд стимуляции до результатов измерений, полученных в данном исследовании.

a — Область выраженных двигательных реакций, с высокой вероятностью инициируемых высокоамплитудными ультразвуковыми сигналами (Fyodorova, Lapshin, 1990). Эта зона, скорее всего, связана с активностью слухового рецептора $TO A_2$. В зоне “*a*” двигательные реакции регистрируются наиболее надежно: ответы имеют стереотипную форму и повторяются от предъявления к предъявлению. Если бабочка до стимуляции щелкала, то высокоамплитудные стимулы акустическую активность подавляют. В области выше зоны “*a*” для совок более характерна остановка полета в ответ на стимуляцию.

б — Область попыток бабочек непредсказуемо маневрировать в ответ на акустические стимулы. Вероятность таких реакций снижается с увеличением количества повторных сеансов акустической стимуляции (Agee, 1969a; 1969b).

в — Типичная частотно-пороговая характеристика рецептора A_1 (Fyodorova, Lapshin, 1990; Лапшин, Воронцов, 2004), приведенная на ри-

сунке для удобства сравнения данных поведенческих и электрофизиологических измерений.

г — Усредненная поведенческая аудиограмма, полученная в опытах с регистрацией попыток насекомого совершать маневры в горизонтальной плоскости (Лапшин, Воронцов, 2000, 2004). Зоны “б”, “г” и “д” ассоциируются с активностью наиболее чувствительного слухового рецептора A_1 .

д — Область нестабильных поведенческих реакций совок на акустические стимулы.

е — Положение усредненной аудиограммы, измеренной при помощи датчика курсового аэродинамического усилия (в соответствии с рис. 5 и 6).

Диапазон по шкале уровней диаграммы между самым нижним оптимумом реакций и самым верхним составляет примерно 60 дБ — это значение соответствует тысячекратному соотношению уровней акустической стимуляции. Практически в каждой закрашенной точке диаграммы можно получить развернутую форму двигательной реакции бабочки на звук, особенно при первом предъявлении. Однако при последующей стимуляции вероятность реакций уже существенно зависит от уровня сигналов и интервалов их следования. Не зная этих нюансов, легко сделать неверное заключение о недостоверности получаемых данных.

Существенные различия в порогах в вариантах тестирования “г” и “е” можно объяснить тем, что типы маневров (развороты в горизонтальной плоскости или ускорение полета) в естественных условиях могли развиваться при реализации разных стратегий поведения. Вариант “г” логично отнести к реакции избегания источника ультразвука (отклонение в полете в бок от траектории потенциального хищника — защитная реакция при нападении летучих мышей), тогда как увеличение интенсивности полета и, следовательно, скорости (вариант “е”) вполне могло быть частью поведенческой программы, направленной на выход из зоны облучения ультразвуком в сочетании с минимизацией уровня эха от крыльев (Roeder, Treat, 1961). Неравномерное изменение вероятности реакций бабочек вдоль оси интенсивности сигналов можно объяснить приуроченностью тех или иных поведенческих паттернов к определенным уровням внешних акустических сигналов.

То обстоятельство, что измеренные в экспериментах электрофизиологические пороги, как правило, оказывались выше результатов поведенческих тестов, не вызывает особого удивления, так как у животных критерии обнаружения биологически важных сигналов с высокой вероятностью не соответствуют исторически сложившимся требованиям к результатам экспериментальных исследований. Тем не менее субъективными факторами можно объяснить разницу порядка 6 дБ, но не 20 дБ или более.

Скорее всего высокая акустическая чувствительность совок обеспечивается несколькими механизмами, в полной мере активными только у интактных насекомых. Какие это могут быть механизмы?

1. *Синхронное детектирование с накоплением информации.* Суть синхронного детектирования состоит в увеличении чувствительности восприятия очередного сигнала в ритмическом потоке. В качестве косвенного признака активности такого механизма можно принять задержку поведенческого ответа бабочки на интервале от 0.5 до 2 стимулирующих серий, т.е. после накопления ответов на 4–16 пульсов (рис. 5). Характерные признаки синхронного детектирования ритмических сигналов в ЦНС совок ранее были обнаружены в процессе акустической стимуляции подопытных насекомых смесью из двух ритмических последовательностей (Лапшин, 2010, 2011).

2. *Модуляция чувствительности клеток A_1 со стороны центральной нервной системы, в том числе, посредством гуморальных факторов.*

3. *Эффект стохастического резонанса.* При измеримом уровне сигнала и аддитивных шумов присутствие шума на входе приемника повышает вероятность обнаружения сигнала (Bezrukov, Vodyanov, 1997). Экспериментально рост эффективности выделения слуховыми интернейронами ритмической составляющей сигнала при добавлении полосового шума ранее был показан Н.Г. Бибиковым (Bibikov, 2002).

4. *Сканирование по частотному диапазону путем перестройки резонанса ТО.* Метод потенциально обладает повышенной помехозащищенностью, так как реальное восприятие звука при этом происходит не в широком диапазоне частот, например, 10–140 кГц, а селективно, в пределах ширины резонансной кривой.

5. *Настройка одного из резонансов ТО на частоту входного сигнала.* Этот режим требует определенного времени для настройки на стимул и больше подходит для слежения за уже обнаруженным сигналом. В электрофизиологических экспериментах эффект настройки на воспринимаемый сигнал был описан для высокочастотной части диапазона акустического восприятия совок (Лапшин, Воронцов, 2004).

6. *Специфика обработки сигналов в ЦНС перед запуском того или иного поведенческого ответа.* При формировании реакции маневрирования в горизонтальной плоскости важна информация о пространственном расположении источника звука, которая кодируется на основе различий нейронных откликов в правом и левом ТО. Напротив, реакция ускорения полета могла инициироваться суммарной информацией, поступающей от обоих ТО (Roeder, 1966).

Однонаправленное влияние нескольких из перечисленных механизмов и их возможная приуроченность к конкретным поведенческим программам должны порождать неопределенность в измерении слуховых порогов, причем область такой неопределенности, согласно результатам экспериментов, весьма обширная: на диаграмме рис. 7 ей соответствует зона “*д*” шириной в диапазоне амплитуд порядка 35 дБ. По существу это значение — мера нашего незнания механизмов регуляции слуховой чувствительности совок и, соответственно, реальной стратегии их акустического поведения.

Нет оснований полагать, что многослойная система поведенческих порогов, обнаруженная у совок, представляет собой специфическое свойство этих насекомых. Более вероятно, что подобные многоуровневые системы — обычное явление в природе. Если животное по-разному реагирует на внешние стимулы одной модальности в зависимости от их физических параметров (например, разные поведенческие ответы на громкий, либо тихий акустические сигналы), то значения измеренных порогов будут определяться теми критериями реакций, которые исследователи приняли в процессе подготовки экспериментов. Таким образом, актуализация определенной пороговой области (или слоя) в ходе изучения сенсорной системы животного может зависеть либо от априорных установок, в том числе, принятых по аналогии, либо даже от случайных факторов.

Работа частично поддержана РФФИ (грант № 02-04-48256).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лапшин Д.Н. Эхолокационная система бабочек. М.: Наука, 2005. 207 с.
- Лапшин Д.Н. Центральные механизмы параллельной обработки информации в слуховой системе бабочек (Lepidoptera, Noctuidae). *Сенсорные системы*. 2010. Т. 24. № 3. С. 242–254.
- Лапшин Д.Н. Обработка суммы двух ритмических потоков в центральных отделах слуховой системы бабочек (Lepidoptera, Noctuidae). *Сенсорные системы*. 2011. Т. 25. № 2. С. 143–155.
- Лапшин Д.Н., Воронцов Д.Д. Частотная настройка слуховой системы совок (Lepidoptera, Noctuidae) в полете. *Сенсорные системы*. 2000. Т. 14. № 4. С. 304–313.
- Лапшин Д.Н., Воронцов Д.Д. Процессы захвата и сопровождения акустического сигнала слуховой системой совок (Noctuidae, Lepidoptera). *Сенсорные системы*. 2004. Т. 18. № 3. С. 265–272.
- Лапшин Д.Н., Воронцов Д.Д. Механизмы динамического формирования частотной характеристики слуховой системы совок (Noctuidae, Lepidoptera). *Сенсорные системы*. 2005. Т. 19. № 4. С. 322–331.
- Adams W.B. Mechanical tuning of the acoustic receptor of *Prodenia eridania* (Cramer) (Noctuidae). *J. Exp. Biol.* 1972. V. 57. P. 297–304.
- Agee H.R. Response of flying bollworm moths and other tympanate moths to pulsed ultrasound. *Ann. Entomol. Soc. Amer.* 1969a. V. 62. № 4. P. 801–807. <https://doi.org/10.1093/aesa/62.4.801>
- Agee H.R. Response of *Heliothis* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) to ultrasound when resting, feeding, courting, mating, or ovipositing. *Ann. Entomol. Soc. Amer.* 1969b. V. 62. № 5. P. 1122–1128. <https://doi.org/10.1093/aesa/62.5.1122>
- Bezrukov S.M., Vodyanoy I. Stochastic resonance in non-dynamical systems without response threshold. *Nature*. 1997. V. 385. № 23. P. 319–321. <https://doi.org/10.1038/385319a0>
- Bibikov N.G. Addition of noise enhances neural synchrony to amplitude-modulated sounds in the frog's midbrain. *Hearing Research*. 2002. V. 173. P. 21–28. [https://doi.org/10.1016/s0378-5955\(02\)00456-2](https://doi.org/10.1016/s0378-5955(02)00456-2)
- Callahan P.S., Carlyle T.C. Comparison of the epaulette and microneurules on the tympanic membrane of the corn earworm moth with those of the cabbage looper. *Ann. Entomol. Soc. Amer.* 1972. V. 65. P. 918–925. <https://doi.org/10.1093/aesa/65.4.918>
- Fyodorova M.V., Lapshin D.N. Responses of moths to ultrasounds. *Sensory System and Communication in Arthropods*. Edit. F.G. Gribakin, K. Wiese, A.V. Popov. Basel. Birkhäuser Verlag. 1990. P. 178–182.
- Madsen B.M., Miller L.A. Auditory input to motor neurons of the dorsal longitudinal flight muscles in a noctuid moth (*Barathra brassicae* L.). *J. Comp. Physiol.* 1987. V. 160. P. 23–31. <https://doi.org/10.1007/bf00613438>
- Payne R.S., Roeder K.D., Wallman J. Directional sensitivity of the ears of noctuid moths. *J. Exp. Biol.* 1966. V. 44. № 1. P. 17–32. <https://doi.org/10.1242/jeb.44.1.17>
- Roeder K.D. The behavior of free flying moths in the presence of artificial ultrasonic pulses. *Anim. Behav.* 1962. V. 10. № 3. P. 300–304.
- Roeder K.D. Acoustic sensitivity of the noctuid tympanic organ and its range for the cries of bats. *J. Insect. Physiol.* 1966. V. 12. P. 843–859. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(66\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0022-1910(66)90035-7)
- Roeder K.D. Turning tendency of moths exposed to ultrasound while in stationary flight. *J. Insect. Physiol.* 1967. V. 13. P. 873–888. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(67\)90051-0](https://doi.org/10.1016/0022-1910(67)90051-0)
- Roeder K.D., Treat A.E. Ultrasonic reception by the tympanic organ of noctuid moths. *J. Exp. Zool.* 1957. V. 134. P. 127–158. <https://doi.org/10.1002/jez.1401340107>
- Roeder K.D., Treat A.E. The detection and evasion of bats by moths. *Am. Sci.* V. 49. 1961. P. 135–148.
- Schiolten P., Larsen O.N., Michelsen A. Mechanical time resolution in some insect ears. *J. Comp. Physiol. A*. 1981. V. 143. P. 289–295. <https://doi.org/10.1007/BF00611164>
- Suga N. Functional organisation of two tympanic neurons in noctuid moths. *Jpn. J. Physiol.* 1961. V. 11. P. 666–677. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.11.666>

Surlykke A., Miller L.A. Central branchings of three sensory axons from a moth ear (*Agrotis segetum*, Noctuidae). *J. Insect. Physiol.* 1982. V. 28. № 4. P. 357–364. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(82\)90048-8](https://doi.org/10.1016/0022-1910(82)90048-8)

Windmill J.F.C., Jackson J.C., Tuck E.J., Robert D. Keeping up with bats: dynamic auditory tuning in a moth. *Current Biology.* 2006. V. 16. P. 2418–2423. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.09.066>

Mismatch between electrophysiological and behavioral measurements: example from auditory system of noctuid moths (Lepidoptera, Noctuidae)

D. N. Lapshin^{a, #}

^a Institute for information transmission problems (Kharkevich Institute)
127051 Moscow, Bolshoy Karetny per. 19, build. 1, Russia

[#]E-mail: lapshin@iitp.ru

Mismatch between the sensory thresholds measured in behavioral and physiological experiments is a common phenomenon. In audition, such difference may be present both in the absolute values of thresholds and in the shape of frequency-threshold curve. When the primary auditory neurons demonstrate lower thresholds then the mismatch may be attributed to the motivation of an animal in behavioral experiment. The reasons for the opposite difference are less clear. Here we present behavioral auditory measurements on noctuid moths *Agrochola macilenta* Hbn. and *Scoliopteryx libatrix* L. which were tested with series of acoustic pulses (10–140 kHz) similar to the echolocation calls of bats. In both species, the averaged frequency-threshold plots were similar in form to the physiological audiograms of the primary auditory neurons (A_1 and A_2), however, behavioral thresholds were by ca. 35 dB lower than the physiological ones. We discuss the possible mechanisms of adjustment of the acoustic sensitivity in intact moths, and also how the methods of recording of motor activity of a moth in behavioral experiment may affect the results.

Key words: Noctuidae, acoustic perception, frequency tuning, tympanic organ, flight

REFERENCES

- Lapshin D.N. *Ekholokatsionnaya sistema babochek* [Echolocation system of nocturnal moths]. Moscow. Nauka, 2005. 207 s (in Russian).
- Lapshin D.N. Tsentral'nyye mekhanizmy parallel'noy obrabotki informatsii v slukhovoy sisteme babochek (Lepidoptera, Noctuidae) [Central mechanisms of parallel information processing in the moth auditory system (Lepidoptera, Noctuidae)]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2010. V. 24 (3). P. 242–254 (in Russian).
- Lapshin D.N. Obrabotka summy dvukh ritmicheskikh potokov v tsentral'nykh otdelakh slukhovoy sistemy babochek (Lepidoptera, Noctuidae) [The processing of a mixture of two rhythmic signals by the auditory system in noctuid moths (Lepidoptera, Noctuidae)]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2011. V. 25 (2). P. 143–155 (in Russian).
- Lapshin D.N., Vorontsov D.D. Protsessy zakhvata i soprovozhdeniya akusticheskogo signala slukhovoy sistemoy sovok (Noctuidae, Lepidoptera) [Tuning to and following the acoustic signal by the auditory system in noctuid moths (Noctuidae, Lepidoptera)]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2004. V. 18 (3). P. 265–272 (in Russian).
- Lapshin D.N., Vorontsov D.D. Mekhanizmy dinamicheskogo formirovaniya chastotnykh kharakteristik slukhovoy sistemy sovok (Noctuidae, Lepidoptera) [The mechanism of dynamic frequency tuning in the hearing system of noctuid moths (Noctuidae, Lepidoptera)]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2005. V. 19 (4). P. 322–331 (in Russian).
- Adams W.B. Mechanical tuning of the acoustic receptor of *Prodenia eridania* (Cramer) (Noctuidae). *J. Exp. Biol.* 1972. V. 57. P. 297–304.
- Agee H.R. Response of flying bollworm moths and other tympanate moths to pulsed ultrasound. *Ann. Entomol. Soc. Amer.* 1969. V. 62 (4). P. 801–807. <https://doi.org/10.1093/aesa/62.4.801>
- Agee H.R. Response of *Heliothis* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) to ultrasound when resting, feeding, courting, mating, or ovipositing. *Ann. Entomol. Soc. Amer.* 1969. V. 62(5). P. 1122–1128. <https://doi.org/10.1093/aesa/62.5.1122>
- Bezrukov S.M., Vodyanoy I. Stochastic resonance in non-dynamical systems without response threshold. *Nature.* 1997. V. 385. № 23. P. 319–321. <https://doi.org/10.1038/385319a0>
- Bibikov N.G. Addition of noise enhances neural synchrony to amplitude-modulated sounds in the frog's midbrain. *Hearing Research.* 2002. V. 173. P. 21–28. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(02\)00456-2](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(02)00456-2)
- Callahan P.S., Carlyle T.C. Comparison of the epaulette and micronodules on the tympanic membrane of the corn earworm moth with those of the cabbage looper. *Ann. Entomol. Soc. Amer.* 1972. V. 65. P. 918–925. <https://doi.org/10.1093/aesa/65.4.918>
- Fyodorova M.V., Lapshin D.N. *Responses of moths to ultrasounds*. Sensory System and Communication in Arthropods. Edit. F.G. Gribakin, K. Wiese, A.V. Popov. Basel. Birkhäuser Verlag. 1990. P. 178–182.
- Madsen B.M., Miller L.A. Auditory input to motor neurons of the dorsal longitudinal flight muscles in a noctuid moth (*Barathra brassicae* L.). *J. Comp. Physiol.* 1987.

- V. 160. P. 23–31.
<https://doi.org/10.1007/bf00613438>
- Payne R.S., Roeder K.D., Wallman J. Directional sensitivity of the ears of noctuid moths. *J. Exp. Biol.* 1966. V. 44. № 1. P. 17–32.
<https://doi.org/10.1242/jeb.44.1.17>
- Roeder K.D. The behavior of free flying moths in the presence of artificial ultrasonic pulses. *Anim. Behav.* 1962. V. 10. № 3. P. 300–304.
- Roeder K.D. Acoustic sensitivity of the noctuid tympanic organ and its range for the cries of bats. *J. Insect. Physiol.* 1966. V. 12. P. 843–859.
[https://doi.org/10.1016/0022-1910\(66\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0022-1910(66)90035-7)
- Roeder K.D. Turning tendency of moths exposed to ultrasound while in stationary flight. *J. Insect. Physiol.* 1967. V. 13. P. 873–888.
[https://doi.org/10.1016/0022-1910\(67\)90051-0](https://doi.org/10.1016/0022-1910(67)90051-0)
- Roeder K.D., Treat A.E. Ultrasonic reception by the tympanic organ of noctuid moths. *J. Exp. Zool.* 1957. V. 134. P. 127–158.
<https://doi.org/10.1002/jez.1401340107>
- Roeder K.D., Treat A.E. The detection and evasion of bats by moths. *Am. Sci.* V. 49. 1961. P. 135–148.
- Schiolten P., Larsen O.N., Michelsen A. Mechanical time resolution in some insect ears. *J. Comp. Physiol. A.* 1981. V. 143. P. 289–295.
<https://doi.org/10.1007/BF00611164>
- Suga N. Functional organisation of two tympanic neurons in noctuid moths. *Jpn. J. Physiol.* 1961. V. 11. P. 666–677.
<https://doi.org/10.2170/jjphysiol.11.666>
- Surlykke A., Miller L.A. Central branchings of three sensory axons from a moth ear (*Agrotis segetum*, Noctuidae). *J. Insect. Physiol.* 1982. V. 28. № 4. P. 357–364.
[https://doi.org/10.1016/0022-1910\(82\)90048-8](https://doi.org/10.1016/0022-1910(82)90048-8)
- Windmill J.F.C., Jackson J.C., Tuck E.J., Robert D. Keeping up with bats: dynamic auditory tuning in a moth. *Current Biology.* 2006. V. 16. P. 2418–2423.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.09.066>

ИНТЕРАУРАЛЬНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ МАСКИРОВКА В СЛУХОВОЙ СИСТЕМЕ ДЕЛЬФИНА

© 2022 г. В. В. Попов¹, Д. И. Нечаев¹, А. Я. Супин^{1,*}, Е. В. Сысуева¹

¹ Институт проблем экологии и эволюции РАН 119071 Москва, Ленинский просп., 33, Россия

*E-mail: alex_supin@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 29.04.2022 г.

У бутылконосого дельфина *Tursiops truncatus* измеряли время освобождения коротколатентных слуховых вызванных потенциалов (КСВП) от последовательной маскировки при контактной звуковой стимуляции короткими тональными посылками: при положении источников кондиционирующего и тестирующего сигналов с одной стороны головы (унилатеральная стимуляция) и при положении источников с разных сторон головы (билатеральная стимуляция). В обоих вариантах стимуляции наблюдали значительное подавление тестирующего КСВП при межстимульных задержках менее 1 мс и практически полное восстановление тестирующего ответа (освобождение от маскировки) при задержках около 5 мс. Предполагается, что эффекты последовательной маскировки развиваются преимущественно в бинауральных слуховых структурах, где афферентные потоки от обеих улиток взаимодействуют.

Ключевые слова: китообразные, бинауральный слух, последовательная маскировка

DOI: 10.31857/S0235009222030064

ВВЕДЕНИЕ

Для зубатых китообразных (зубатых китов, дельфинов и морских свиной) характерны уникальные возможности слуховой системы. Обзоры свойств слуха китообразных приведены в нескольких монографиях (Au, 1993; Supin et al., 2001; Au, Hastings, 2008). В этих обзорах отмечаются высокая чувствительность, широкий частотный диапазон, высокое быстродействие, высокая пространственная избирательность слуховой системы. Однако некоторые аспекты работы слуховой системы китообразных по-прежнему представляют интерес для более детального изучения, поскольку касаются фундаментальных механизмов слухового анализа. К таким аспектам, в частности, относится взаимодействие между временным и пространственным анализами.

Значительная часть сведений о пространственной избирательности слуховой системы дельфинов получена методом регистрации коротколатентных слуховых вызванных потенциалов (КСВП). Ввиду сильного развития слуховой системы у дельфинов форма слуховых вызванных потенциалов может быть зарегистрирована неинвазивно, путем наложения регистрирующих электродов на поверхность головы животного. Это свойство делает КСВП приемлемым для исследования широкого круга слуховых функций у китов

и дельфинов. В том числе КСВП широко применялись для исследования пространственной избирательности и временной разрешающей способности.

Методом КСВП для дельфинов была показана значительная острота приемного луча, как бинаурального, создаваемого совместной работой обеих ушей (Popov, Supin, 1988, 2009; Popov et al., 1992; Kastelein et al., 2005), так и моноаурального для каждого уха в отдельности (Popov, Supin, 1991; Popov et al., 2006). Помимо высокой остроты луча приема показана значительная интерауральная разница интенсивности принимаемых сигналов, если их источник не находится на продольной оси головы (Popov, Supin, 1991; Popov et al., 2006; Mulsow et al., 2014). Данные о высокой пространственной избирательности, полученные методом КСВП, дополняются поведенческими данными: показаны острая направленность луча приема (Zaitseva et al., 1975; Au, Moore, 1984) и низкие пороги минимально различаемого угла между источниками звука (minimum audible angle) (Renaud, Popper, 1975; Dubrovskiy, 1990).

Уникальное быстродействие слуховой системы дельфинов также демонстрировалось разными методами. Демонстративные данные, касающиеся быстродействия слуховой системы, были получены при регистрации КСВП, вызванных

короткими парными звуковыми импульсами (Popov, Supin, 1990; Supin, Popov, 1995, 2015; Popov et al., 2001, 2020; Supin et al., 2007). Измерение быстродействия этим методом основано на том, что при коротких межимпульсных интервалах ответ на второй стимул угнетен (вариант прямой последовательной маскировки), однако восстанавливается при удлинении интервала (эффект освобождения от маскировки). Чем выше быстродействие слуховой системы, тем быстрее происходит освобождение от маскировки. Регистрация КСВП показала, что при одинаковом уровне двух импульсов в паре и одинаковых спектральных характеристиках этих импульсов восстановление второго ответа происходит очень быстро: при межимпульсных интервалах от 1 до 5 мс, в зависимости от уровня, одинакового для обоих импульсов. Если уровень первого импульса выше, чем уровень второго, то восстановление может потребовать больше времени (Popov, Supin, 1990; Supin, Popov, 2015); если спектральные характеристики двух импульсов различаются, то восстановление второго ответа происходит еще быстрее (Popov et al., 2001).

Однако отдельное исследование пространственной избирательности и быстродействия слуховой системы не дает полного представления о ее работе в естественных условиях. Сложные акустические сцены, как правило, характеризуются разными временными соотношениями между сигналами, исходящими от разных источников, занимающих в пространстве разное положение относительно животного. Поэтому способность выделять определенный звуковой сигнал из всего многообразия звуков, характеризующего естественную звуковую сцену, зависит не только от пространственной избирательности или быстродействия, но и от взаимодействия между этими двумя характеристиками слуховой системы, т.е. от способности отдельно воспринимать сигналы, приходящие в разное время и с разных направлений. Учитывая уникальные способности слуховой системы дельфинов, такая способность и механизмы ее реализации значимы для понимания фундаментальных механизмов слуха.

К настоящему времени анализ пространственно-временных взаимоотношений слуховой системой дельфинов исследован в минимальной степени. Предметом исследований были либо временное разрешение при одинаковом (чаще всего, на продольной оси головы) положении источников последовательных сигналов, либо пространственная избирательность слуха при неизменном временном соотношении сигналов. В данном исследовании предпринята попытка проанализировать временное и пространственное разрешение слуха дельфина не порознь, а во взаимодействии. Для этого методом парных стимулов в сочетании с регистрацией КСВП измеряли

время восстановления ответа на второй стимул при различном положении источников двух стимулов. Для получения возможно более контрастной картины использовали источники стимулов, расположенные по разные стороны от медиальной плоскости головы: один — справа, другой — слева. Такая схема стимуляции предполагала исследование взаимодействия между сигналами, один из которых поступает преимущественно в правое, а другой — в левое ухо.

Осуществление монауральной стимуляции у дельфинов в свободном поле затруднено из-за специфической организации их звукопроводящих путей. У дельфинов основной путь проведения звуков из внешней среды к слуховой улитке обеспечивается жировым тяжем, расположенным в нижней челюсти (мандибулярная гипотеза, Norris, 1968, 1969; Norris, Harvey, 1974). Звук попадает в этот звукопроводящий канал через “звуковое окно” — тонкую костную стенку на наружной поверхности нижней челюсти (мандибулы). Мандибулярная гипотеза была подтверждена измерением порогов потенциалов действия слухового нерва (McCormick et al., 1970; 1980) и слуховых вызванных потенциалов ствола мозга (Bullock et al., 1968). Однако более поздние исследования показали, что местом вхождения звука в мандибулярный проводящий канал может быть не только латеральная, но и медиальная поверхность нижней челюсти (Cranford et al., 2008; Popov et al., 2016). Поэтому при латеральном положении источника звук может передаваться к обеим (правой и левой) слуховым улиткам; например, при правостороннем расположении источника справа звук может достигать улитки как через латеральную поверхность правой половины нижней челюсти, так и через медиальную поверхность левой половины; при левостороннем расположении — наоборот.

Чтобы исключить эту неопределенность, в данном исследовании мы использовали контактную звуковую стимуляцию, при которой источник звука непосредственно контактировал с звуковым окном на латеральной поверхности нижней челюсти, в зоне максимальной чувствительности к звуковым сигналам. Возможность прохождения звука через звуковое окно контралатеральной стороны при этом полностью не исключалась, но обеспечивался намного больший уровень звука на стороне расположения излучателя, чем на контралатеральной стороне.

МЕТОДИКА

Объект и условия эксперимента. Объектом исследования была взрослая (28 лет) самка бутылконового дельфина (афалины) *Tursiops truncatus*. До использования в данном исследовании животное в течение 25 лет находилось в коммерческом

дельфинарии. Во время исследования животное содержали на Утришской морской станции Российской академии наук (Краснодарский край, Новороссийский район) в бассейне, наполненном морской водой (диаметр 6 м, глубина 1.7 м). По окончании серии экспериментов животное было возвращено в коммерческий дельфинарий.

На время эксперимента уровень воды в бассейне понижали до 35 см. Животное укладывали на носилки, выполненные из звукопрозрачного материала (рыболовная сеть). Носилки с животным устанавливали на опоры; при низком уровне воды в бассейне спина животного и дорзальная поверхность головы с дыхалом оставались над поверхностью воды. Тем самым обеспечивались беспрепятственное дыхание и надводное положение участков для установки регистрирующих электродов.

Эксперименты проводили ежедневно, длительность эксперимента составляла 2–3 ч, после чего животное освобождали из носилок и уровень воды в бассейне восстанавливали до 1.7 м.

Регистрация КСВП. Для регистрации КСВП на поверхности тела устанавливали два электрода: активный и референтный. Электроды удерживались присосками. Активный электрод устанавливали на дорзальной поверхности головы, по средней линии, 7–8 см каудальнее дыхала; референтный электрод — на спинном плавнике; оба электрода над поверхностью воды. Заземляющий электрод находился в воде, в которую было погружено тело животного.

Электроды для регистрации биопотенциалов были соединены экранированными кабелями со входом усилителя биопотенциалов LP511 (Grass Technologies, Warwick, США). Усилитель обеспечивал усиление 80 дБ в диапазоне частот 100–3000 Гц. Усиленные биопотенциалы подавали на вход 16-битного аналого-цифрового преобразователя, который входил в состав платы сбора данных NI DAQ-6251 (National Instruments, Austin, США). Частота стробирования для оцифровки составляла 40 кГц. Дальнейшую обработку сигналов, переведенных в цифровую форму, выполняли при помощи стандартного персонального компьютера.

Звуковая стимуляция. Стимулами служили тональные посылки с несущей частотой 64 кГц. Как показали многочисленные предшествующие исследования (Supin et al., 2001), эта частота лежит в пределах диапазона высокой слуховой чувствительности у бутылконосых дельфинов. Несущая частота была модулирована огибающей в форме одного периода смещенной косинусоиды (рис. 1, а). Период огибающей частоты был таким, что посылка содержала шесть циклов несущей. Спектр такой посылки имеет пик на несущей частоте 64 кГц и эквивалентную (по мощности) прямо-

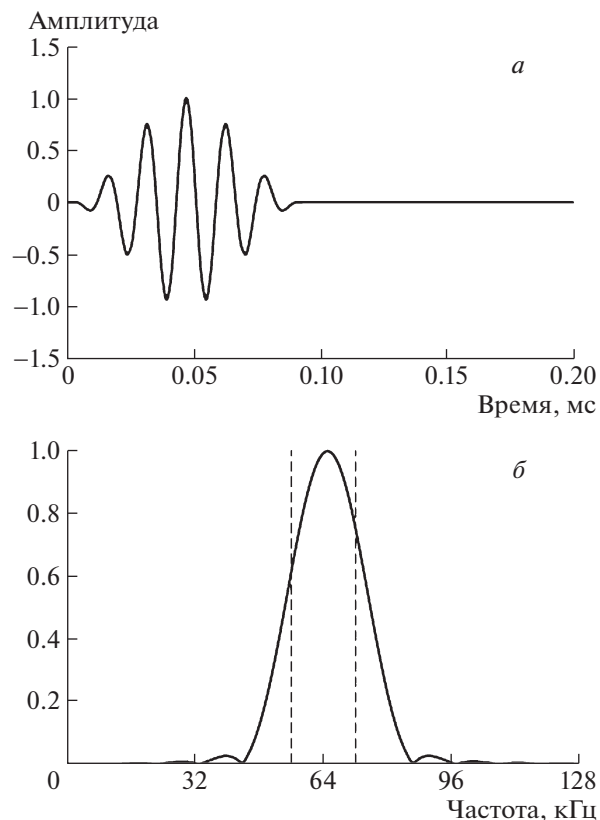


Рис. 1. Характеристики звуковых стимулов.

а — форма сигнала, б — спектр сигнала; вертикальные пунктирные линии обозначают эквивалентную прямоугольную ширину.

угольную ширину ± 8 кГц относительно центральной частоты (б).

Стимулы синтезировали в цифровой форме с использованием стандартного персонального компьютера и программы собственной разработки, составленной в программной оболочке LabVIEW (National Instruments). Частота стробирования составляла 512 кГц (восемь точек на один цикл несущей частоты), что не только соответствовало пределу Найквиста, но и позволяло с хорошей точностью генерировать сигналы с несущей частотой 64 кГц. Программа обеспечивала синтез двух стимулов (тональных посылок) с независимыми характеристиками и с регулируемой задержкой один (тестирующий) относительно другого (кондиционирующего). Тестирующий и кондиционирующий стимулы могли подаваться либо через один и тот же излучатель (унилатеральная стимуляция), либо через разные излучатели, один из которых контактировал с правой, а другой — с левой стороной головы (билатеральная стимуляция).

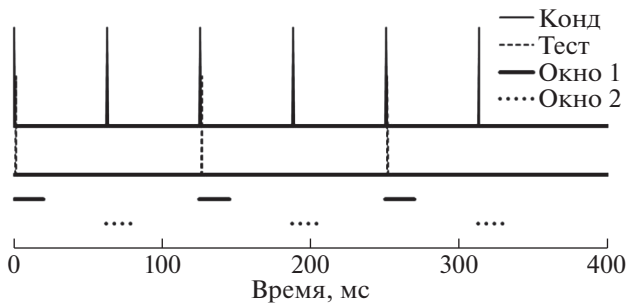


Рис. 2. Временная диаграмма предъявления кондиционирующего и тестирующего стимулов (только моменты предъявления стимулов, без точного воспроизведения их формы). Приведен фрагмент последовательности импульсов длительностью 400 мс (полная длина последовательности 125 с). *Конд* — кондиционирующий стимул, *Тест* — тестирующий стимул, *Окно 1* — регистрация ответа на пару стимулов, *Окно 2* — регистрация ответа на кондиционирующий стимул. Задержка тестирующего стимула относительно кондиционирующего не демонстрируется на сжатой шкале времени.

Стимулы, синтезированные в цифровой форме, преобразовывали в аналоговую форму при помощи двухканального 16-битного цифроаналогового преобразователя, входящего в состав той же платы сбора данных, которая выполняла регистрацию биопотенциалов.

Стимулы, преобразованные в аналоговую форму, усиливали по мощности усилителями собственной разработки (полоса воспроизводимых частот 0.1–200 кГц) и воспроизводили через пьезокерамические преобразователи В&К 8104 (Bruel & Kjaer, Naerum, Дания). Два преобразователя, воспроизводящие стимулы в двух каналах, имели идентичные характеристики. Для контактной звуковой стимуляции ассистент экспериментатора, защищенный гидроизолирующим костюмом, находился в экспериментальном бассейне рядом с животным и удерживал излучатели звука таким образом, чтобы боковая цилиндрическая (излучающая) поверхность каждого из них касалась, но не прижималась к зоне акустического окна на латеральной поверхности нижней челюсти, под водой: один — справа, другой — слева.

При использованном способе стимуляции животное воспринимало звуковое излучение в ближнем поле преобразователя. В этих условиях интенсивность воспринимаемого звука не могла быть охарактеризована способом, принятым для дальнего поля, как уровень звукового давления в точке приема (дБ относительно 1 мкПа звукового давления). Поэтому интенсивность звука представляли в относительных единицах, как уровень источника звука: дБ относительно 1 мкПа на расстоянии 1 м от источника. Уровень источника

звука рассчитывали по данным калибровки преобразователя в режиме излучения, представленной производителем.

Программа эксперимента и обработка данных. Основной методический прием данной работы состоял в применении парных звуковых стимулов от двух разных источников и определении времени освобождения ответа на второй стимул от последовательной маскировки. Одна из проблем, возникающих при такой схеме эксперимента, состоит в том, что при коротких межстимульных интервалах ответы на первый (кондиционирующий) и на второй (тестирующий) стимулы частично накладываются друг на друга, что затрудняет измерение характеристик второго ответа. Известное решение этой проблемы состоит в использовании процедуры вычитания: из ответов на пару стимулов вычитается ответ, вызванный только одним кондиционирующим стимулом. Предполагается, что таким образом можно выделить второй ответ в чистом виде.

Этот методический прием вполне эффективен, но он удовлетворительно работает только в том случае, если ответ, вызванный кондиционирующим стимулом в паре, и ответ, вызванный одним кондиционирующим стимулом, абсолютно идентичны. Это условие не всегда удается соблюсти по ряду причин. Одна из них состоит в том, что для выделения КСВП из шума приходится усреднять от нескольких сотен до нескольких тысяч реализаций. Хотя слуховая система дельфинов реагирует на стимулы, предъявляемые в темпе 10–20 или более имп/с, накопление необходимого количества реализаций требует времени, измеряемого минутами. За это время может измениться положение животного в носилках, положение излучателя относительно головы, или произойти другие изменения, хотя бы и незначительные. В результате в разностной кривой будет присутствовать не полностью скомпенсированный первый ответ, что не позволит точно измерить амплитуду второго ответа. Еще одна причина неполной компенсации первого ответа состоит в разной степени адаптации слуха. Серия из пар стимулов имеет больший средний уровень, чем серия из только кондиционирующих стимулов, что приведет к разной степени адаптации и также к неполной компенсации кондиционирующего ответа.

Чтобы исключить или хотя бы минимизировать эти эффекты, в данной работе было применено чередующееся предъявление пар стимулов и одиночных кондиционирующих стимулов (рис. 2).

Ожидали, что при такой схеме эксперимента любые долговременные изменения чувствительности, как случайные, так и связанные с адаптацией, будут одинаково влиять на амплитуду кондиционирующих ответов при действии как пар-

ных, так и только кондиционирующих стимулов, что обеспечит необходимый результат процедуры вычитания.

Для выделения сигнала из шума методом усреднения последовательность, в которой чередовались парные и кондиционирующие стимулы, повторялась 1000 раз. Полученная запись содержала чередующиеся парные и одиночные ответы. Программа собственной разработки, созданная в программной оболочке LabVIEW, выделяла из этой записи 20-мс эпохи и сортировала их таким образом, чтобы получить усредненную запись ответов на пару стимулов и ответа на кондиционирующий стимул (рис. 3).

Вычитанием одной формы потенциалов из другой программа также выделяла ответы на тестирующий стимул.

Для накопления данных, необходимых для выделения КСВП из фонового шума, чередующиеся стимулы (пара кондиционирующий-тестирующий и только кондиционирующий) предъявляли с частотой 16 имп/с, всего по 1000 стимулов каждого вида. Таким образом, накопление данных для получения одного комплекта КСВП занимало 125 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эффективность выделения ответа на тестирующий стимул. В соответствии с ожиданиями примененная методика чередующегося предъявления пар стимулов и кондиционирующего стимула дала хорошие результаты. Эффективность метода проверяли путем регистрации ответов при таких задержках между кондиционирующим и тестирующим стимулами, при которых перекрытие ответов на оба стимула было незначительным, так что можно было идентифицировать каждый из ответов. Пример такого эксперимента показан на рис. 3. При межстимульной задержке, равной 1 мс, суммарный ответ на пару стимулов имеет сложную форму и образован несколькими колебаниями; латентный период регистрируемого комплекса (включая акустическую задержку) 1.2 мс (1). Ответ только на кондиционирующий стимул имеет тот же латентный период, но меньшую длительность из-за отсутствия в комплексе ответа на задержанный стимул (2). Процедура вычитания дает кривую, в которой отсутствуют коротколатентные компоненты, т.е. отсутствует незадержанный ответ (3). Поэтому колебания потенциала, выделенного процедурой вычитания, являются ответом на задержанный стимул.

Приведенный пример показывает, что при равной интенсивности двух стимулов амплитуда задержанного (тестирующего) ответа меньше, чем амплитуда незадержанного (кондиционирующего). Этот эффект показывает, что тестирую-

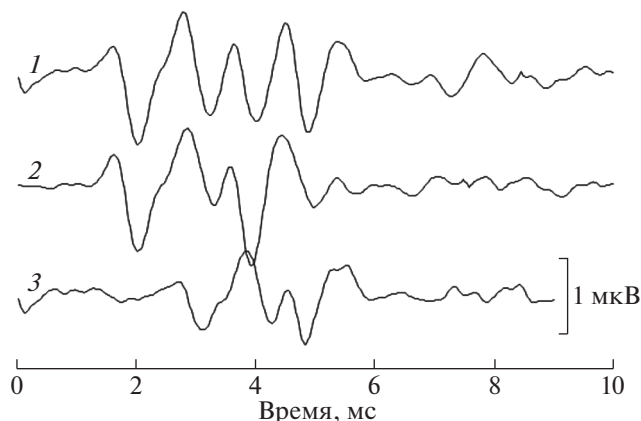


Рис. 3. Выделение ответа на тестирующий стимул процедурой вычитания (билатеральная стимуляция). Негативность активного электрода соответствует отклонению вверх.

1 — ответ на пару стимулов с межстимульным интервалом 1 мс; 2 — ответ на кондиционирующий стимул; 3 — результат поточечного вычитания кривой 2 из кривой 1; выявляется ответ, задержанный на 1 мс относительно ответа на кондиционирующий стимул. Коротколатентные компоненты, характерные для ответа на кондиционирующий стимул, отсутствуют в разностной кривой.

щие ответы, выделенные методом вычитания, могут быть использованы для измерения зависимости амплитуды тестирующего ответа от межстимульного интервала.

Зависимость амплитуды тестирующего ответа от межстимульного интервала при унилатеральной и билатеральной стимуляции. Используя методику разностных кривых для выявления ответа на тестирующий стимул, исследовали зависимость амплитуды тестирующего ответа от межстимульного интервала. Сравнивали результаты, полученные при унилатеральной и билатеральной стимуляции. Для компенсации возможной асимметрии слуховой чувствительности усредняли данные, полученные при симметричных вариантах расположения источников звука.

— При унилатеральной стимуляции регистрировали КСВП, когда источники обоих стимулов находились сначала справа, потом слева. Результаты обеих серий усредняли.

— При билатеральной стимуляции регистрировали КСВП, когда источник кондиционирующего стимула находился справа, а тестирующего — слева. Затем положения двух источников меняли на противоположные. Результаты обеих серий усредняли.

При всех вариантах стимуляции стимулы с приведенными выше параметрами вызывали чет-

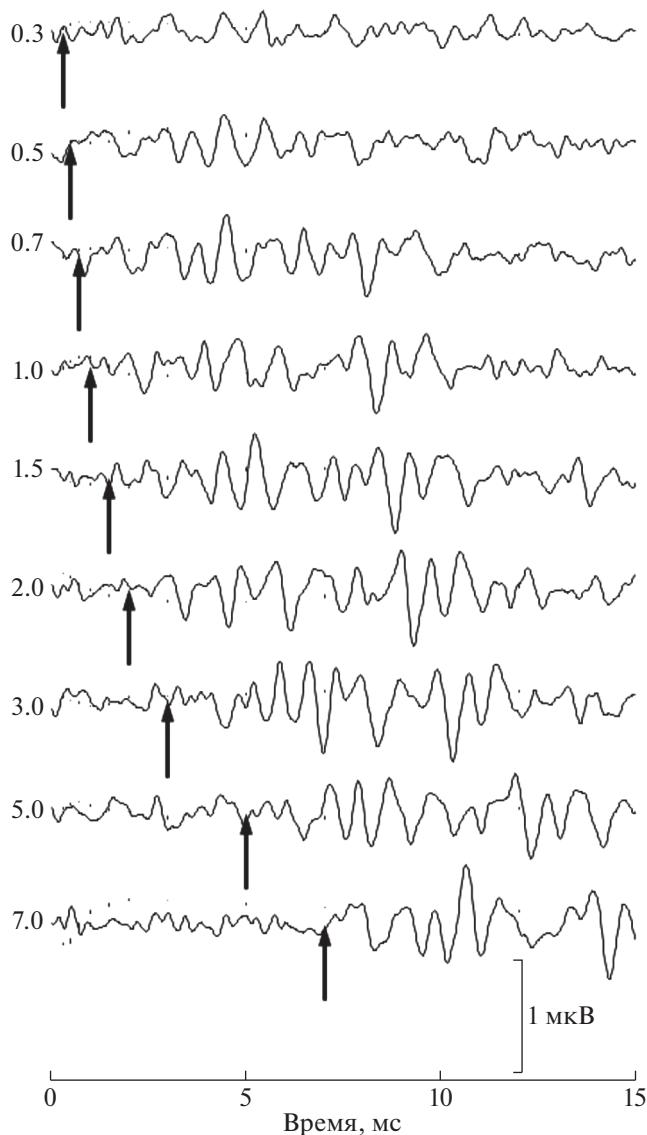


Рис. 4. КСВП на тестирующий стимул при различных межстимульных задержках при унилатеральной контактной стимуляции. Усреднение ответов, полученных при право- и левостороннем положении источников звука. Негативность активного электрода соответствует отклонению вверх. Представлены только тестирующие ответы, выделенные из оригинальных записей; кондиционирующие ответы удалены процедурой поточечного вычитания. Момент кондиционирующего стимула соответствует началу записи, момент тестирующего стимула отмечен стрелкой. Межстимульные задержки (от 0.3 до 7 мс) указаны около записей.

кие КСВП. Амплитуда тестирующего ответа зависела от межстимульного интервала.

На рис. 4 представлены КСВП, возникающие в ответ на задержанный (тестирующий) стимул с задержками от 0.3 до 7 мс, полученные при унилатеральном расположении источников обоих

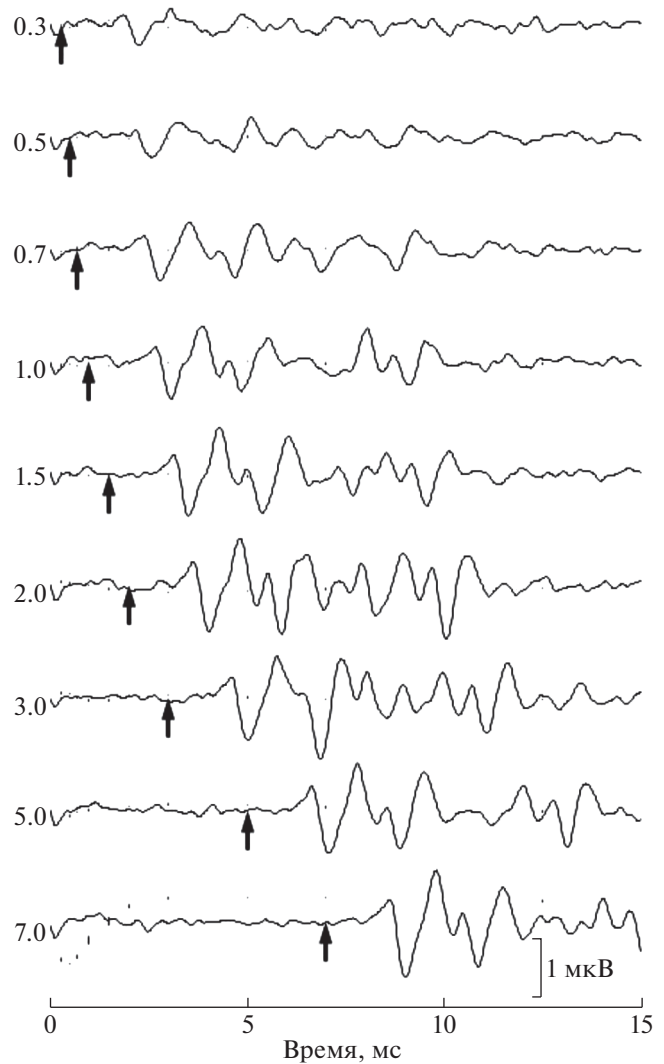


Рис. 5. То же, что рис. 4, при билатеральной стимуляции. Усреднение ответов, полученных при право- и левостороннем положении источника кондиционирующих стимулов и, соответственно, лево- и правостороннем положении источника тестирующих стимулов.

стимулов (усреднение данных, полученных при право- и левостороннем расположении).

Ответы на кондиционирующий стимул в приведенных записях удалены применением процедуры вычитания. На рис. 5 представлены аналогичные КСВП, полученные при билатеральном расположении источников двух стимулов (усреднение данных, полученных при право- и левостороннем расположении источника кондиционирующего стимула и, соответственно, лево- и правостороннем расположении источника тестирующего стимула).

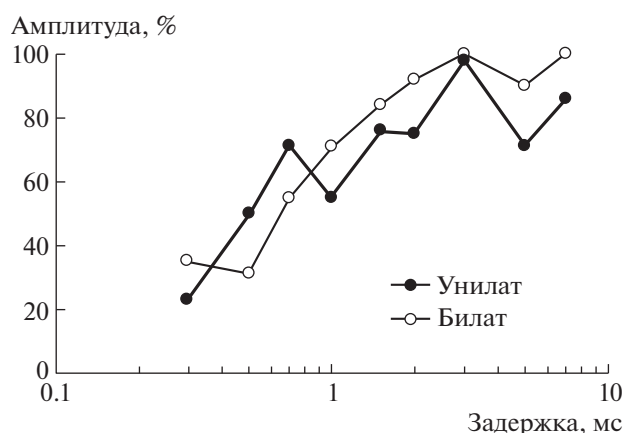


Рис. 6. Зависимость амплитуды тестирующего КСВП (в процентах, от амплитуды кондиционирующего ответа на стимул такой же интенсивности) от межстимульного интервала при уни- и билатеральной стимуляции (как указано в легенде).

Обе серии демонстрируют качественно сходную динамику зависимости ответа от межстимульного интервала: значительное угнетение ответа при коротких интервалах и восстановление при удлинении интервала. Количественно зависимость амплитуды КСВП от межстимульного интервала при унилатеральной и билатеральной стимуляции представлена графиками на рис. 6.

Амплитуду КСВП измеряли как разность между позитивным и негативным максимумами ответа. Оба графика демонстрируют значительное угнетение тестирующего ответа при коротких интервалах (начиная с 0.3 мс) и восстановление при удлинении интервалов до 5 мс и более. Графики для унилатеральной и билатеральной стимуляции не совпадают, но расхождения между ними имеют характер скорее случайных отклонений, чем закономерного различия. Различия между двумя графиками не достигают критерия статистической достоверности ($P = 0.22$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Основной результат проведенных исследований состоял в том, что унилатеральная (оба стимула приходят с одной стороны) и билатеральная (кондиционирующий и тестирующий стимулы приходят с разных сторон головы) стимуляции вызывают у дельфина практически одинаковую последовательную маскировку тестирующего стимула: значительное подавление тестирующего ответа при межстимульных интервалах короче

1 мс и освобождение от маскировки при интервалах от нескольких мс.

Электрод для регистрации КСВП, установленный на средней линии головы, одинаково регистрирует электрические потенциалы, генерируемые право- и левосторонними структурами мозга. КСВП, регистрируемый в таких условиях, является суммой электрической активности право- и левосторонних структур.

Использованный в данной работе метод контактной стимуляции позволяет определить, на каком уровне слуховой системы развивается последовательная маскировка, проявляющаяся в снижении амплитуды КСВП при парных стимулах с короткими интервалами. Метод контактной стимуляции не может полностью устранить “перекрестную” стимуляцию, т.е. стимуляцию правой слуховой улитки при расположении источника звука слева, или наоборот, поскольку не исключено распространение звука к слуховой улитке противоположной стороны. При контактной стимуляции следует, по меньшей мере, ожидать, что стимуляция ипсилатеральной слуховой улитки будет намного более интенсивной, чем контралатеральной. Поэтому представленные выше данные позволяют оценить, в какой части слуховой системы — монауральной или бинауральной — возникают эффекты последовательной маскировки. Если бы эффекты последовательной маскировки возникали в монауральных слуховых структурах, бинауральная стимуляция (кондиционирующий стимул подается в одну слуховую улитку, тестирующий — в другую) не могла бы привести к значительному угнетению тестирующего ответа. Одинаковые эффекты последовательной маскировки для унилатеральной и билатеральной стимуляции означают, что эффекты последовательной маскировки развиваются преимущественно в бинауральных слуховых структурах, где афферентные потоки от обеих улиток взаимодействуют.

Применительно к анализу звуковых сцен в естественных ситуациях этот вывод означает, что анализ временной динамики звуковых сигналов от “целевого” источника зависит от наличия источников звука в других секторах сцены — не только в ипсилатеральном, но и в контралатеральном секторе, и звуковой шум от этих источников может маскировать сигнал. Вместе с тем, благодаря высокому быстродействию процессов в слуховой системе дельфина, в любом случае последовательная маскировка кратковременная, и освобождение от маскировки происходит в течение нескольких мс после прекращения действия маскира.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант 22-25-00025).

Interaural forward masking in the auditory system of a dolphin

V. V. Popov^a, D. I. Nechaev^a, A. Ya. Supin^{a, #}, and E. V. Sysueva^a

^a Institute of Ecology and Evolution, RAS 119071 Moscow, Leninsky Prospect, 33, Russia

[#] E-mail: alex_supin@mail.ru

The time of release of auditory brainstem responses (ABRs) from forward masking was measured in a bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* using two manners of contact stimulation by tone pips: (i) the sources of the conditioning and test stimuli were positioned at one side of the head (the unilateral stimulation) and (ii) the sources were positioned at opposite sides of the head (the bilateral stimulation). In both cases, the test response was substantially suppressed at interstimulus intervals shorter than 1 ms. The test response entirely released from masking at intervals of 5 ms or longer. It is suggested that the effects of forward masking appear mostly in binaural auditory structures where signals from the two cochleae interact.

Key words: Cetacea, binaural hearing, forward masking

REFERENCES

- Au W.W.L. The Sonar of Dolphins. New York: Springer, 1993.
- Au W.W.L., Hastings M. C. Principles of Marine Bioacoustics. New York: Springer, 2008.
- Au W.W.L., Moore P.W.D. Receiving beam patterns and directivity indices of the Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus*. *J. Acoust. Soc. Am.* 1984. V. 75. P. 255–262.
- Cranford T.W., Krysl P., Hildebrand J.A. Acoustic pathways revealed: Simulated sound transmission and reception in Cuvier's beaked whale (*Ziphius cavirostris*). *Bioinspir. Biomim.* 2008. V. 3. P. 016001.
- Dubrovskiy N.A. On the two auditory systems in dolphins. Sensory Abilities of Cetaceans. Laboratory and Field Evidence. Eds. Thomas J.A., Kastelein R.A. New York: Plenum, 1990. P. 233–254.
- Kastelein R.A., Janssen M., Verboom W.C., de Haan D. Receiving beam patterns in the horizontal plane of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*). *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 118. P. 1172–1179.
- McCormick J.G., Wever E.G., Palin G., Ridgway S.H. Sound conduction in the dolphin ear. *J. Acoust. Soc. Am.* 1970. V. 48. P. 1418–1428.
- McCormick J.G., Wever E.G., Ridgway S.H., Palin G. Sound reception in the porpoise as it relates to echolocation. *Animal Sonar Systems*. Eds. Busnel R. G., Fish J. F. New York, Plenum. 1980. P. 449–467.
- Mulsow J., Finneran J.J., Houser D.S. Interaural differences in the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) auditory nerve response to jawphone stimuli. *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. V. 136. P. 1402–1409.
- Norris K.S. The evolution of acoustic mechanisms in odontocete cetaceans. *Evolution and Environment*. Ed. Drake E. T. New Haven, CT, Yale University. 1968. P. 297–324.
- Norris K.S. The echolocation of marine mammals. *The Biology of Marine Mammals*. Ed. Andersen. H. J. New York: Academic, 1969. P. 391–424.
- Norris K.S., Harvey G.W. Sound transmission in the porpoise head. *J. Acoust. Soc. Am.* 1974. V. 56. P. 659–664.
- Popov V.V., Nechaev D.I., Sysueva E.V., Supin A.Ya. The rate of cochlear compression in a dolphin: a forward-masking evoked-potential study. *J. comp. Physiol. A.* 2020. V. 206. P. 757–766.
- Popov V.V., Supin A.Ya. Diagram of auditory directionality in the dolphin *Tursiops truncatus* L. *Dokl. Biol. Sci.* 1988. V. 300. P. 323–326.
- Popov V.V., Supin A.Ya. Auditory brain stem responses in characterization of dolphin hearing. *J. Comp. Physiol. A.* 1990. V. 166. P. 385–393.
- Popov V.V., Supin A.Ya. Interaural intensity and latency difference in the dolphin's auditory system. *Neurosci. Lett.* 1991. V. 133. P. 295–297.
- Popov V.V., Supin A.Ya. Comparison of directional selectivity of hearing in a beluga whale and a bottlenose dolphin. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 126. P. 1581–1587.
- Popov V.V., Supin A.Ya., Klishin V.O. Electrophysiological study of sound conduction in dolphins. *Marine Mammal Sensory Systems*. Eds. Tomas J.A., Kastelein R.A., Supin A.Ya. New York, London: Plenum, 1992. P. 269–276.
- Popov V.V., Supin A.Ya., Klishin V.O. Auditory brainstem response recovery in the dolphin as revealed by double sound pulses of different frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. P. 2227–2233.
- Popov V.V., Supin A.Ya., Klishin V.O., Bulgakova T.N. Monaural and binaural hearing directivity in the bottlenose dolphin: Evoked-potential study. *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 119. P. 636–644.
- Popov V.V., Sysueva E.V., Nechaev D.I., Lemazina A.A., Supin A.Ya. Auditory sensitivity to local stimulation of the head surface in a beluga whale (*Delphinapterus leucas*). *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 140. P. 1218–1226.
- Renaud D.L., Popper A.N. Sound localization by the bottlenose porpoise *Tursiops truncatus*. *J. Exp. Biol.* 1975. V. 63. P. 569–585.
- Supin A.Ya., Nachtigall P.E., Breese M. Evoked-potential recovery during double click stimulation in a whale: A possibility of biosonar automatic gain control. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 121. P. 618–625.
- Supin A.Ya., Popov V.V. Temporal resolution in the dolphin's auditory system revealed by double-click evoked potential study. *J. Acoust. Soc. Am.* 1995. V. 97. P. 2586–2593.
- Supin A.Ya., Popov V.V. Evoked-potential recovery during double click stimulation in a beluga whale: Implications for biosonar gain control. *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. V. 137. P. 2512–2521.
- Supin A.Ya., Popov V.V., Mass A.M. The Sensory Physiology of Aquatic Mammals. Boston: Kluwer, 2001.
- Zaitseva K.A., Akopian A.I., Morozov V. P. Resistance of the auditory analyzer of the dolphin as a function of the angle of presentation of the interference. *Biophysics*. 1975. V. 20. P. 531–534.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ
СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.374.33

**РАДИОСЕНСОРНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СЛОЖНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО УЗЛА**© 2022 г. К. А. Бойков^{1,*}¹ МИРЭА – Российский технологический университет 119454 Москва, просп. Вернадского, 78, Россия

*E-mail: nauchnyi@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 03.04.2022 г.

Принята к публикации 21.04.2022 г.

Основными преимуществами метода пассивной радиосенсорной технической диагностики (ПРТД) над наиболее значимыми способами определения технического состояния (виброметрия, тепловой контроль, JTAG-тестирование, оптический контроль) являются: отсутствие инерции, отсутствие затрат процессорного времени, отсутствие гальванического контакта с объектом исследования. Однако в современной научной литературе практически не уделяется внимания анализу сигнальных радиопрофилей (СРП) электрической составляющей электромагнитных излучений, созданных сложными электронными узлами (СЭУ). Цель данного исследования – развитие метода ПРТД посредством анализа сигнальных радиопрофилей СЭУ с декомпозицией и экстракцией параметров. В работе представлены выражения для колебательного перераспределения энергии, описывающие процесс формирования СРП. Предложен новый способ декомпозиции СРП, позволяющий получить информацию об основных параметрах излучателей СЭУ. Подготовлен и проведен эксперимент по регистрации и исследованию СРП в различных режимах работы СЭУ. Получены значения параметров СРП, указывающие на наличие неисправности в электронном узле, либо на неверный режим функционирования. Данные исследования могут быть использованы в пассивной радиосенсорной технической диагностике, при определении аппаратных неисправностей, либо деградации параметров элементов на ранних стадиях.

Ключевые слова: сигнальный радиопрофиль, корреляционный анализ, декомпозиция сигнала, экстракция параметров, техническая диагностика

DOI: 10.31857/S0235009222030027**ВВЕДЕНИЕ**

Надежность современных электронных устройств (ЭУ) в настоящее время неуклонно растет. Несмотря на это, высокая стоимость, уникальность, тяжелые условия монтажа и пусконаладочных работ, использование на объектах критической инфраструктуры (Кубарев и др., 2020; Masloboev, 2020), вызывают необходимость создания эффективных методов технической диагностики (ТД) – отрасли научно-технических знаний, сущность которых составляют теория, методы и средства обнаружения, и поиск дефектов объектов технической природы (Еременко, 2012).

Изменение значения внутренних параметров электронных узлов с выходом их за допустимые пределы могут привести к преждевременным отказам либо сбоям функционирования ЭУ. Современные методы по определению технического состояния ЭУ направлены на обнаружение и локализацию возникших неисправностей или предсказания появления неисправностей ввиду обна-

ружения скрытых дефектов. Помимо старения и деградации электронных устройств возможными являются неисправности, связанные с дефектами, не выявленными в ходе производственных исследований. Данные неисправности могут проявиться в любое время при эксплуатации электронного изделия в условиях воздействия реальных факторов.

Анализ современного состояния научно-технической проблемы ТД показал, что каждый из методов имеет свои недостатки, порой несовместимые с объектом исследования. Техническая диагностика – творческий процесс, основанный на совместном использовании этих способов, от носительство которых возникают разногласия среди исследователей. Применение того или иного способа проверки исправности элементов объекта зависит от конкретного типа ЭУ, личных качеств оператора и условий проведения исследования.

Развитием теории технической диагностики является метод ПРТД (Бойков и др., 2021; Бой-

Таблица 1. Сравнительная таблица основных параметров методов ТД

Метод ТД	Возможность функциональной диагностики	Бесконтактное получение информации	Время, необходимое для проведения единичной диагностики	Независимость от опыта исследователя
Тепловой	+	+/-	От нескольких секунд	+
Электрический	—	+	От нескольких секунд	+
Магнитный	—	+	От нескольких секунд	+
Радиационный	—	+	От нескольких секунд	+
Радиоволновой	—	+	От нескольких миллисекунд	+
Оптический	—	+	От нескольких миллисекунд	—
Справочников	+	—	От нескольких минут	—
Радиосенсорный	+	+	От нескольких миллисекунд	+

ков, Костин, 2021), основанный на регистрации электрической составляющей ближнего поля (или СРП), при собственных излучениях электронных узлов. Пассивная радиосенсорная техническая диагностика имеет существенные преимущества перед современными методами ТД (в том числе и перед JTAG-тестированием (Hu et al., 2019): не требует гальванического контакта с исследуемым образцом, не занимает процессорное время и не влияет на объект исследования. На основе обзора научной литературы, в табл. 1 приведен общий сравнительный анализ основных параметров особо значимых методов ТД.

Один из самых популярных на сегодняшний день тепловой метод ТД обладает высокой инерционностью и невозможностью регистрации быстроизменяющихся процессов. Электрический, магнитный, радиационный, радиоволновой и оптический методы ТД требуют наличия сложного оборудования по созданию, излучению и приему электромагнитных волн с различным частотным спектром, что усложняет процесс диагностики. К тому же данные методы ТД требуют остановки функционирования объекта исследования, что зачастую неприемлемо. Недостатками самого доступного из методов технической диагностики — метода справочников, является тесная взаимосвязь результатов диагностики с опытом исследователя, необходимость доступа ко всем узлам и соединениям, чувствительность к погрешностям вычислений. Перечисленных недостатков лишен новый радиосенсорный метод ТД, основное отличие которого от известного радиоволнового метода заключается в отсутствии генератора зондирующих импульсов.

Исследование пассивной радиосенсорной технической диагностики — актуальная задача, позволяющая открыть новые возможности теории ТД, дистанционно определяя неисправности ЭУ на самых ранних стадиях, не оказывая влияния на объект исследования.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Как и любой другой метод технической диагностики, ПРТД имеет свой инструментарий, а также набор диагностируемых параметров, явно или косвенно получаемых в результате проводимых исследований.

Колебательное перераспределение энергии. Наличие фильтрующих и паразитных емкостей в ЭУ при подаче напряжения питания ведет к перераспределению энергии между элементами фильтрации и паразитными реактивными накопителями (далее — накопителями), которое имеет колебательный характер. Затухание колебаний здесь будет зависеть от соотношения нагрузочных параметров потребителей и накопителей, причем чем меньше нагрузка потребителя, тем медленнее затухают колебания. Также в электронных узлах ЭУ имеет место возникновение колебательного перераспределения энергии между накопителями, в роли которых выступают емкости подзатворных диэлектриков МОП-структур, барьерные и диффузионные емкости p-n переходов, переходов Шоттки (Ткаченко, 2018).

Для излучения при колебательном перераспределении энергии мощность должна быть передана от источника на излучающий элемент. На практике наиболее часто встречается непосредственное излучение источника, например, подводящих линий или отдельного компонента. Также встречаются излучения через подключенные кабели питания, шины данных или сигнальные линии.

Аналитически отношение величины нагрузок потребителей и накопителей определяется значением корней характеристического уравнения, составленного для электрической цепи (Башарин, 2018):

$$RCp + LCp^2 + 1 = 0, \quad (1)$$

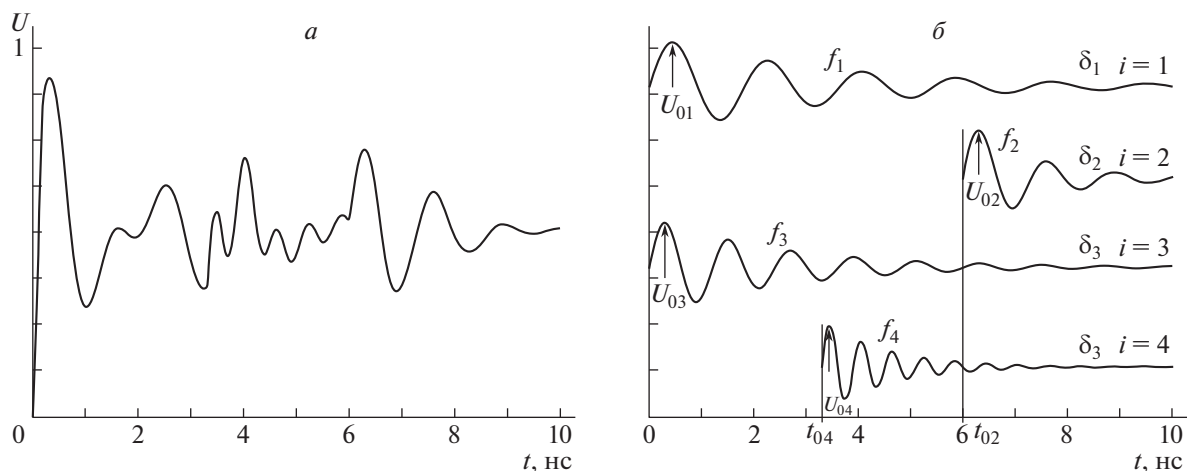


Рис. 1. Сигнальные радиопрофили *a* – суперпозиция излучений; *b* – составляющие СРП.

где R – общее омическое сопротивление, L – общая индуктивность, C – общая емкость, p – параметр, равный $\frac{dU}{dt}$.

Следует заметить, что порядок данного уравнения равен числу независимых накопителей энергии, под которыми понимаются паразитные индуктивности и емкости в схеме соединения элементов электронного узла. В случае цепей третьего порядка и выше найти параметры колебаний можно лишь приближенно, выделив отдельные составляющие процесса. Однако, исследуя природу возникновения реактивных накопителей, их номиналы и способы соединения, с незначительной погрешностью (на практике менее 5%) можно привести уравнения высших порядков к уравнению (1). Решение данного уравнения – решение с нулевой правой частью, соответствует режиму, когда внешняя принуждающая сила источника на цепь непосредственно не воздействует. Влияние проявляется здесь через энергию, запасенную в полях индуктивных и емкостных накопителей, т.е. речь идет о свободном режиме работы, и общее решение уравнения (1) называется свободной составляющей (U_{CB}).

Выражение для свободной составляющей определяется видом корней характеристического уравнения и зависит от значений параметров элементов цепи (R , L , C). При колебательном характере процесса перераспределения энергии между накопителями корни характеристического уравнения (1) комплексно-сопряженные $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega$.

Наличие пары комплексно-сопряженных корней обуславливает появление затухающих синусоидальных колебаний. Тогда выражение свободной составляющей имеет вид (Башарин, 2018)

$$U_{CB}(t) = U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где U_0 – начальная амплитуда колебаний (постоянная интегрирования, зависящая от значений параметров накопителей), δ – коэффициент затухания, ω – угловая частота колебаний, φ – начальная фаза колебаний (постоянная интегрирования, зависящая от значений параметров накопителей).

Поскольку обычно электронный узел состоит из группы компонентов, итоговый СРП узла – суперпозиция СРП входных и выходных цепей его составляющих, излучающих свободные затухающие колебания в моменты времени, соответствующие приходу управляющего импульса (Бойков, 2021):

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{CBi}(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} e^{-\delta_i(t-t_{0i})} \sin[\omega_i(t-t_{0i})], \quad (3)$$

где t – текущий момент времени, t_0 – момент времени начала излучения i -го колебания.

Выражение (3) является основным уравнением для СРП, излучаемого электронным узлом устройства и справедливо только при выполнении условия $t - t_{0i} \geq 0$, а при $t - t_{0i} < 0$: $U_{CBi} = 0$. С физической точки зрения это означает отсутствие i -го колебания в момент, когда в соответствующем узле или элементе еще не происходит перераспределение энергии между реактивными накопителями. Также в выражении (3) отсутствует начальная фаза излучения, поскольку этот параметр косвенно входит в t_0 .

На рис. 1 представлен сложный СРП, иллюстрирующий выражение (3).

Декомпозиция СРП. Для детального исследования СРП необходимо представить его в виде суммы составляющих сигналов, математическая обработка которых более проста и более полно раскрывает информационные аспекты исходного сигнала (Reddy, Rameshwar, 2019).

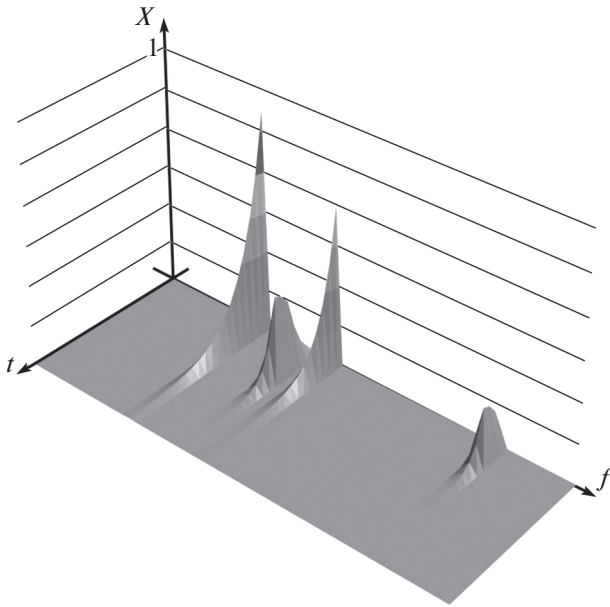


Рис. 2. Частотно-временной спектр сигнальных радиопрофилей.

Для получения информации о коэффициенте затухания и времени начала излучения (фазе) для каждого из колебаний предлагается воспользоваться идеей оконного преобразования Фурье (Астахов и др., 2019; Данилов, 2020) и получить спектр затухающих колебаний со сдвигом на каждый дискрет:

$$X(f, h) = \sum_{c=h}^{O-1+h} U(O) \exp\left(-j \frac{2\pi f c}{O}\right), \quad (4)$$

где K – общее число точек СРП, O – число точек, образующих “окно” преобразования, h – номер отсчета положения “окна” ($0 < h < K - O$), $U(O)$ – сигнал, дискретизированный во времени, c – номер отсчета.

Для удобства отображения по полученным отсчетам строится двумерная зависимость нормированной (приведенной) амплитуды спектра сигнала от частоты и от положения “окна” (рис. 2).

Положение окна на оси времени t связано с h через частоту дискретизации f_{Δ} СРП: $t = \frac{h}{f_{\Delta}}$.

По данной зависимости нетрудно определить частоту излучения f (по максимумам частотной характеристики) и момент времени начала излучения i -го колебания. Поскольку положение “окна” изменяется со временем, то при его приближении к моменту начала излучения i -го колебания значение приведенного амплитудного спектра на данной частоте увеличивается и достигает максимума. Далее по мере продвижения

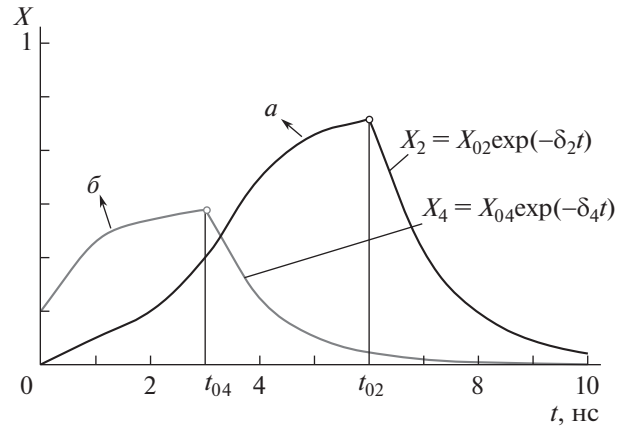


Рис. 3. Определение времени начала излучения a – для $i = 2$; b – для $i = 4$.

“окна” по оси времени происходит затухание приведенного амплитудного спектра с тем же коэффициентом, что и затухание i -го колебания:

$$X_i = X_{0i} e^{-\delta_i \cdot t}, \quad (5)$$

где X_{0i} – приведенный амплитудный спектр i -го колебания в начальной точке.

Момент перехода от возрастания к затуханию (точка экстремума) и есть точка начала излучения (рис. 3).

Время начала излучения можно определить двумя способами. По дискретам кривых (рис. 2 и 3) найти максимальное значение X . Искомая величина – ордината точки t_0 . Данный метод не обладает высокой точностью, поскольку сильно зависит от частоты дискретизации. Более точное определение времени включения излучения t_{0i} возможно при аппроксимации кривых полиномом j -й степени с последующим нахождением экстремума:

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{d\left(\sum_{n=0}^j c_n t^n\right)}{dt} = 0, \quad (6)$$

где c_n – коэффициенты полинома.

Очевидно, чем выше степень аппроксимации, тем точнее полученное значение. Анализ показывает, что данный метод при $j = 6$ позволяет повысить точность нахождения времени включения приблизительно на 30%.

Амплитудный спектр является суммой амплитуд колебаний во времени, для нахождения амплитуды первой полуволны каждого колебания необходимо провести операцию дифференцирования по времени (определить скорость измене-

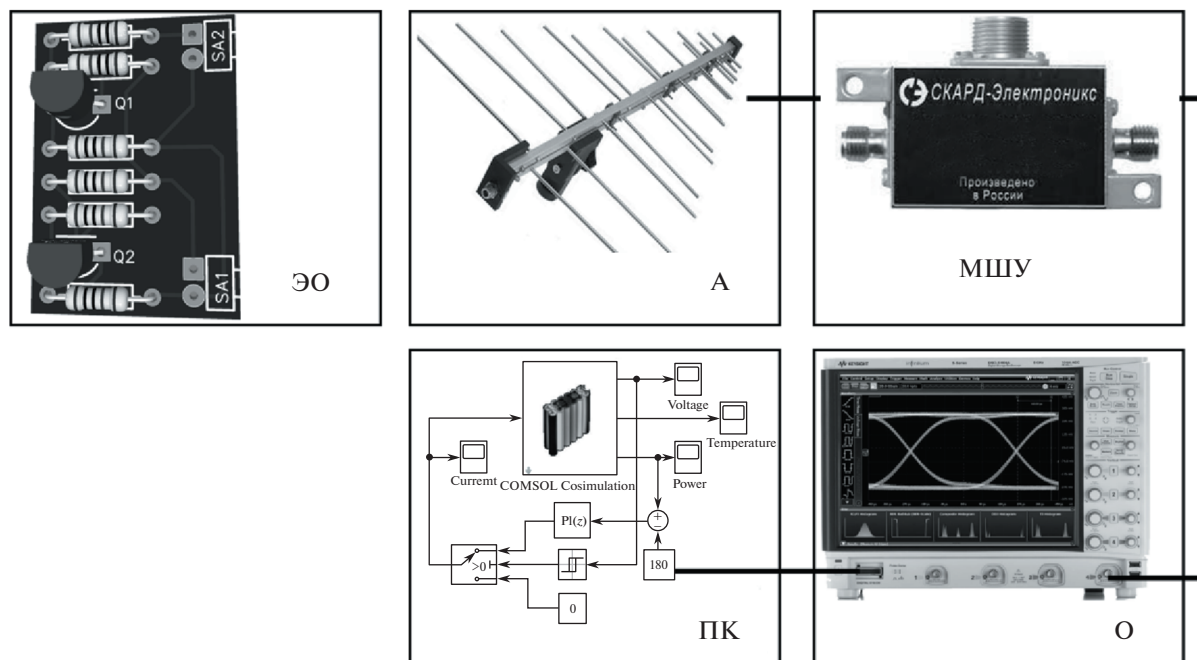


Рис. 4. Блок-схема измерительной системы (ЭО – экспериментальный образец, А – измерительная антенна, МШУ – малошумящий сверхширокополосный усилитель, О – сверхбыстродействующий осциллограф реального времени, ПК – персональный компьютер).

ния v_i) приведенного амплитудного спектра в начальной точке:

$$v_i = \frac{dX_i}{dt} = -X_{0i}\delta_i \exp(-\delta_i t). \quad (7)$$

Таким образом, подставив начальный момент времени ($t = 0$) в выражение (7), можно записать

$$v_i = -X_{0i}\delta_i. \quad (8)$$

Знак “–” в выражении (8) говорит об изменении приведенного амплитудного спектра в сторону уменьшения.

Поскольку на рис. 2 представлены приведенные значения уровня сигнала, то и работать необходимо с приведенными начальными амплитудами. Для определения значений начальных амплитуд колебаний каждого из излучателей нужно найти максимальное значение параметра $|v_i|$ и относительно него найти начальные амплитуды (привести к $|v_i|$):

$$U_{0i} = \frac{|v_i|}{|v_{i\max}|}. \quad (9)$$

Подготовка и проведение эксперимента. Для проведения испытаний по регистрации СРП с дальнейшей декомпозицией и анализом параметров построена измерительная система, представленная на рис. 4.

Сигнальный радиопрофиль, излученный ЭО (экспериментальным образцом – исследуемым

устройством), принимается широкополосной антенной А (сверхширокополосная измерительная логопериодическая антенна *П6-122М2*, производитель *СКАРД-Электроникс, Россия*) и усиливается МШУ – малошумящим сверхширокополосным усилителем (*АСК001030*, производитель *СКАРД-Электроникс, Россия*). Усиленный СРП обнаруживается и регистрируется сверхбыстродействующим осциллографом реального времени О (*DSOS604A*, производитель *Keysight Technologies Company Ltd., Kumai*). Полученные в результате измерения данные передаются в персональный компьютер ПК для декомпозиции и экстракции параметров СРП.

На рис. 5 представлен разработанный для проведения испытаний ЭО, состоящий из параллельно соединенных: ключа на МОП-транзисторе и ключа на биполярном транзисторе (БПТ).

Управляющее напряжение на затвор МОП-транзистора *2N7000* (Q1) и базу БПТ *BC547* (Q2) от источника питания + 5 В, подключенного к разъему SA1, подается посредством замыкания контактов SA2. R1 – переключатель, R2 – подтягивающий резистор 100 кОм, R3, R6 – нагрузка 100 Ом, R4, R5 – делитель напряжения. Эксперимент будет проведен для трех случаев: нормальное функционирование; отсутствие нагрузки Q1 (демонтаж R3); повышение напряжения питания до +6 В.

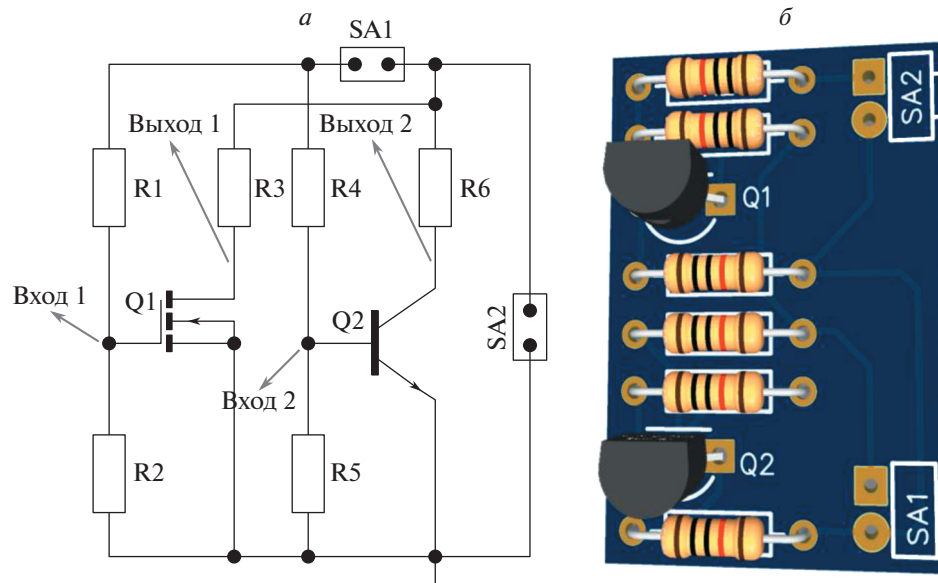


Рис. 5. Составной узел на МОП-транзисторе и БПТ.
 а — электрическая принципиальная схема; б — общий вид.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После подачи управляющего напряжения составной узел ЭО излучает сложный СРП, который регистрируется и обрабатывается измерительной системой (рис. 4). СРП корректно функционирующего образца в дальнейшем будем называть репером. Как было сказано выше, ито-

Таблица 2. Значения параметров репера и СРП без нагрузки Q1

Образцы	N	f , ГГц	δ , нс ⁻¹	t_0 , нс	U_0
Репер (вход 1)	1	0.66	-0.32	0	1
Без нагрузки (вход 1)	1	0.68	-0.31	0	0.95
Несоответствие, %	—	3	3	—	5
Репер (вход 2)	1	0.93	-0.45	0	1
Без нагрузки (вход 2)	1	0.98	-0.43	0	0.98
Несоответствие, %	—	5	5	—	2
Репер (выход 1)	1	0.83	-0.77	5.2	1
Без нагрузки (выход 1)	—	—	—	—	—
Несоответствие, %	—	—	—	—	—
Репер (выход 2)	1	1.89	-0.88	3	0.7
Без нагрузки (выход 2)	1	1.8	-0.85	3.1	0.73
Несоответствие, %	—	5	4	3	5

говый сигнальный радиопрофиль составного узла — суперпозиция излучений входных и выходных цепей. Излучения входной цепи МОП-транзистора (вход 1) в основном связаны с емкостью затвора, а выходной (выход 1) с емкостью донной части р-п-перехода сток-подложка. Время включения выходного излучения связано с быстродействием самого элемента (параметр Turn-On Delay Time). Излучения входной цепи БПТ (вход 2) в основном связаны с емкостью перехода база-эмиттер, значение которой имеет сильную нелинейную зависимость от напряжения. Излучения выходной цепи БПТ (выход 2) связаны с емкостью перехода коллектор-подложка. Время включения выходного излучения связано с частотой переключения.

На рис. 6 показаны СРП репера в сравнении с СРП ЭО без нагрузки (R3 демонтирован) и СРП ЭО с повышенным напряжением питания +6 В (ПНП). В табл. 2 и 3 представлены значения параметров, зарегистрированных СРП.

Результаты эксперимента показывают, что значения параметров СРП, полученных при различных типах неисправностей, позволяют не только определить саму неисправность, но и локализовать ее.

ОБСУЖДЕНИЕ

При отсутствии нагрузки Q1 из СРП полностью пропал один излучатель, связанный с выходной цепью (выход 1, рис. 6, а). Значения остальных параметров изменились в пределах погрешности измерения. Число N в выражении (3)

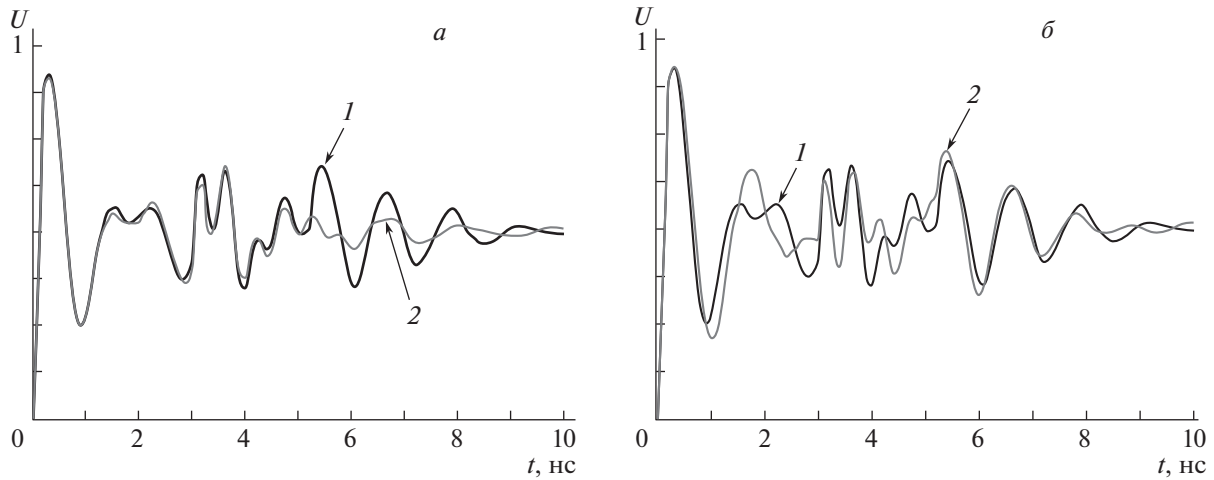


Рис. 6. Сравнение сигнальных радиопрофилей.

a – ЭО без нагрузки (R3 демонтирован); *б* – ЭО с повышенным напряжением питания +6 В. Кривые: 1 – репер, 2 – исследуемый СРП.

показывает число источников затухающих колебаний (рис. 1), зная которое можно определить, все ли интересующие элементы узла участвуют в излучении. Для этого необходимо знать число излучателей в реперном СРП, зарегистрированном от априори функционального узла. В случае, если N полученного СРП меньше, чем число излучателей репера N_p , то следует делать вывод о выходе из строя, либо шунтировании некоторых компонентов интересующего узла, либо о некорректном производстве измерения. Принять решение в данной ситуации поможет совокупность параметров СРП. В случае равенства – все элементы узла участвуют в излучении. При превышении числа излучателей в тестовом СРП по сравнению с репером можно говорить о неверном вычислении данного параметра, либо некорректном производстве измерения.

При подаче повышенного напряжения питания на ЭО наиболее заметно изменение частоты излучения входной цепи БПТ (на 16%, рис. 6, б). Для определения причины данного изменения необходимо учесть, что входная емкость БПТ база-эмиттер СВЕ равна сумме диффузионной C_{BED} и барьерной C_{BEB} составляющих (Vostokov et al., 2020):

$$CBE = C_{BED} + C_{BEB}. \quad (10)$$

Поскольку эмиттерный переход работает в прямом смещении, то $C_{BED} \gg C_{BEB}$ и можно записать (Разевиг, 1999)

$$CBE \approx C_{BED} = t_f \frac{dI_B}{dV_{BE}}, \quad (11)$$

где t_f – расчетное время переноса заряда через базу, I_B – ток базы, V_{BE} – падение напряжения на переходе база-эмиттер.

В свою очередь

$$t_f = TF \left[1 + XTF \left(\frac{I_B}{I_B + ITF} \right)^2 e^{\frac{V_{BC}}{1.44 \cdot VTF}} \right], \quad (12)$$

где TF – время переноса заряда через базу в нормальном режиме, XTF – коэффициент, определяющий зависимость TF от смещения база-коллектор (V_{BC}), ITF – ток, характеризующий зависимость TF от тока коллектора, VTF –

Таблица 3. Значения параметров репера и СРП с некорректным питанием

Образцы	N	f , ГГц	δ , нс ⁻¹	t_0 , нс	U_0
Репер (вход 1)	1	0.66	-0.32	0	1
НП (вход 1)	1	0.69	-0.33	0	0.96
Несоответствие, %	–	5	3	–	4
Репер (вход 2)	1	0.93	-0.45	0	1
НП (вход 2)	1	0.80	-0.42	0	0.96
Несоответствие, %	–	16	7	–	4
Репер (выход 1)	1	0.83	-0.77	5.2	1
НП (выход 1)	1	0.87	-0.76	5.5	0.98
Несоответствие, %	–	5	2	6	2
Репер (выход 2)	1	1.89	-0.88	3	0.7
НП (выход 2)	1	2	-0.83	3.2	0.75
Несоответствие, %	–	6	6	7	7

напряжение, характеризующее зависимость ТФ от V_{BC} (Разевиг, 1999).

Из выражения (12) видно, что расчетное время переноса заряда через базу, а следовательно, и входная емкость база-эмиттер имеют сильную нелинейную зависимость от напряжения (V_{BC}), что обуславливает заметное изменение частоты излучения входной цепи БПТ.

Значения выходных параметров также существенно изменились, что связано с изменением выходных барьерных емкостей обратно смещенных р-п-переходов полупроводниковых компонентов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в представленной работе впервые исследован сложный сигнальный радио-профиль, полученный от СЭУ. Предложенные выражения для колебательного перераспределения энергии и способ декомпозиции позволяют провести экстракцию параметров СРП с последующим их анализом. Сравнение параметров репера и СРП экспериментального образца с дефектом позволяет определить не только тип неисправности и место ее возникновения, но и неверный режим работы электронных компонентов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о преимуществах метода ПРТД по сравнению с существующими на сегодняшний день методами ТД — это скорость принятия решения, отсутствие инерционности и гальванического контакта с исследуемым объектом. Следует заметить, что все измерения по регистрации излучаемого СРП с последующим анализом были проведены дистанционно, без доступа к экспериментальному образцу, что открывает новые возможности в проведении ТД молниеносно развивающихся электронных устройств.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной статьи подтвердил отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахов Н.В., Башкиров А.В., Журилова О.Е., Макаров О.Ю. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье. *Радиотехника*. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 109–112.
- Башарин С.А. *Теоретические основы электротехники*. М.: Академия, 2018. 192 с.
- Бойков К.А. Моделирование и анализ колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в ключевых радио-электронных схемах на МОП-транзисторах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>
- Бойков К.А. Определение параметров электронных устройств методом пассивной радиосенсорной технической диагностики. Известия высших учебных заведений России. *Радиоэлектроника*. 2021. С. 63–70. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>
- Бойков К.А., Костин М.С., Куликов Г.В. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутри-схемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств. *Российский технологический журнал*. 2021. № 9 (4). С. 20–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>
- Бойков К.А., Костин М.С. *Метод радиосенсорной технической диагностики микропроцессорных устройств*. Новые технологии высшей школы. Наука, техника, педагогика (Россия, Москва, 26 марта 2021 г.). М.: Московский Политех, 2021. С. 119–123.
- Данилов Д.Е. Оконное преобразование Фурье при вычислении частотно-временных корреляционных функций. *Globus: Технические науки*. 2020. № 4 (35). С. 20–25.
- Еременко В.Т. *Техническая диагностика электронных средств*. Орел: ФГБОУ ВПО “Госунiversитет — УНПК”, 2012. 157 с.
- Кубарев А.В., Лапсарь А.П., Асютников А.А. Синтез модели объекта критической информационной инфраструктуры для безопасного функционирования технической системы в условиях деструктивного информационного воздействия. *Вопросы кибербезопасности*. 2020. № 6 (40). С. 48–56. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2020-06-48-56>
- Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. М.: Солон, 1999. 698 с.
- Ткаченко Ф.А. Электронные приборы и устройства. М.: Инфра-М, 2018. 156 с.
- Hu Y., Li W., Wang Y.F., Jin G., Jiang X. A JTAG-based management bus on backplane for modular instruments. *J. Instrumentation*. 2019. Т. 14. № 9. P. T09002.
- Masloboev A.V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2020. No. 4 (32). P. 115–130. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-4-13>
- Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA. *J. Electron. Sci. Technol.* 2019. V. 17. No. 2. P. 135–151.
- Vostokov N.V., Revin M.V., Shashkin V.I. Microwave detector diodes based on InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures. *J. Applied Physics*. 2020. V. 127. No. 4. P. 044503. <https://doi.org/10.1063/1.5131737>

Radio-sensor technical diagnosis complex electronic assembly

K. A. Boikov^{a, #}

^a MIREA – Russian Technological University 119454 Moscow, prosp. Vernadsky, 78, Russia

[#] E-mail: nauchnyi@yandex.ru

The main advantages of the method of passive radiosensor technical diagnostics (PRTD) over the most significant methods for determining the technical condition (vibrometry, thermal control, JTAG testing, optical control) are: no inertia, no processor time, no galvanic contact with the object of study. In modern scientific literature, almost no attention is paid to the analysis of signal radio profiles (SRP) of the electrical component of electromagnetic radiation created by the electronic device itself. The purpose of this study is to develop the PRTD method by analyzing complex SRPs with decomposition and parameter extraction. The paper presents expressions for the oscillatory redistribution of energy, which describe the process of formation of the SRP. A new method of SRP decomposition is proposed, which makes it possible to obtain information about the main parameters of the emitters of the electronic assembly. An experiment was prepared and carried out to register and study the SRP of a composite electronic assembly in various operating modes. The values of the SRP parameters were obtained, indicating the presence of a malfunction in the electronic unit, or an incorrect mode of operation. These studies can be used in PRTD, in determining hardware failures, or degradation of element parameters in the early stages.

Key words: signal radio profile, correlation analysis, signal decomposition, parameter extraction, technical diagnostics

REFERENCES

- Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.Ye., Makarov O.Yu. Chastotno-vremennoy analiz nestatsionarnykh signalov metodami veyvlet-preobrazovaniya i okonnogo preobrazovaniya Fur'ye [Time-Frequency Analysis of Nonstationary Signals by Wavelet Transform and Windowed Fourier Transform]. *Radiotekhnika* [Radio engineering]. 2019. T. 83. № 6 (8). P. 109–112 (in Russian).
- Basharin S.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. M.: Akademiya, 2018. 192 p. (in Russian).
- Boikov K.A. Modelirovaniye i analiz kolebatel'nogo perezraspredeleniya energii pri sobstvennykh elektromagnitnykh izlucheniyyakh v klyuchevykh radioelektronnykh skhemakh na MOP-tranzistorakh [Modeling and analysis of oscillatory redistribution of energy with own electromagnetic radiation in key radio-electronic circuits on MOS transistors]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2021. № 6. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>. (in Russian).
- Boikov K.A. Opredeleniye parametrov elektronnykh ustroystv metodom passivnoy radiosensornoy tekhnicheskoy diagnostiki [Determination of the parameters of electronic devices by the method of passive radio sensor technical diagnostics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [News of higher educational institutions of Russia. Radioelectronics]. 2021. P. 63–70. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70> (in Russian).
- Boikov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V. Radiosensornaya diagnostika tselostnosti signalov vnustrikhemnoy i periferiynoy arkhitektury mikroprotssornykh ustroystv [Radiosensor diagnostics of signal integrity of in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices]. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian technological journal]. 2021. V. 9 (4). P. 20–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27> (in Russian).
- Boikov K.A., Kostin M.S. Metod radiosensornoy tekhnicheskoy diagnostiki mikroprotssornykh ustroystv [Method of radio sensor technical diagnostics of microprocessor devices]. *Novyye tekhnologii vysshey shkoly. Nauka, tekhnika, pedagogika* [New technologies of higher education. Science, technology, pedagogy]. Moscow: Moskovskiy Politekh, 2021. P. 119–123 (in Russian).
- Danilov D.Ye. Okonnoye preobrazovaniye Fur'ye pri vychislenii chastotno-vremennykh korrelyatsionnykh funktsiy [Windowed Fourier Transform in Computing Time-Frequency Correlation Functions]. *Globus: Tekhnicheskkiye nauki* [Globus: Engineering Sciences]. 2020. № 4 (35). P. 20–25 (in Russian).
- Yeremenko V.T. Tekhnicheskaya diagnostika elektronnykh sredstv [Technical diagnostics of electronic means]. Orel: FGBOU VPO “Gosuniversitet – UNPK”, 2012. 157 p. (in Russian).
- Kubarev A.V., Lapsar' A.P., Asyutikov A.A. Sintez modeli ob"yekta kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury dlya bezopasnogo funktsionirovaniya tekhnicheskoy sistemy v usloviyakh destruktivnogo informatsionnogo vozdeystviya [Synthesis of a critical information infrastructure object model for the safe functioning of a technical system under destructive information impact]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues]. 2020. № 6 (40). P. 48–56. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2020-06-48-56>. (in Russian).
- Razevig V.D. Sistema skvoznogo proyektirovaniya elektronnykh ustroystv [System of end-to-end design of

- electronic devices] Design Lab 8.0. M.: Solon, 1999. 698 p. (in Russian).
- Tkachenko F.A. Elektronnyye pribory i ustroystva [Electronic appliances and devices]. M.: Infra-M, 2018. 156 p. (in Russian).
- Hu Y., Li W., Wang Y.F., Jin G., Jiang X. A JTAG-based management bus on backplane for modular instruments. *J. Instrumentation*. 2019. T. 14. № 9. P. T09002.
- Masloboev A.V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2020. No. 4 (32). P. 115–130. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-4-13>.
- Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA. *J. Electron. Sci. Technol.* 2019. V. 17. No. 2. P. 135–151.
- Vostokov N.V., Revin M.V., Shashkin V.I. Microwave detector diodes based on InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures. *J. Applied Physics*. 2020. V. 127. No 4. P. 044503. <https://doi.org/10.1063/1.5131737>.

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАДВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СНИМКА С НАКЛОННОЙ ПРОЕКЦИЕЙ

© 2022 г. А. В. Кваснов^{1,*}

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Россия

*E-mail: Kvasnov_AV@spbstu.ru

Поступила в редакцию 20.11.2021 г.

После доработки 29.01.2022 г.

Принята к публикации 05.02.2022 г.

В статье представлено исследование точности определения координат надводной поверхности с использованием камеры с наклонной проекцией снимка. Проблема измерений на мультиспектральных фотоизображениях, позволяющих на основе фотограмметрии оценивать координаты местности (особенно вблизи линии горизонта) с заданной потенциальной точностью, до сих пор недостаточно изучена. В рамках проективной геометрии сформулирована теоретическая постановка задачи. Научная новизна исследования заключается в аналитическом решении задачи по расчету координат относительно линии горизонта и демонстрации прикладных особенностей реализации для надводной поверхности. Показано, что влияние крутизны Земли на точность определения координат для проекционного снимка, полученного на фиксированных высотах в диапазоне 100–10000 м, не превышает величины 1% относительно «плоской» подстилающей поверхности. Сходимость объектов на проекционном снимке к видимой линии горизонта существенно сокращает точность измерений их координат. Для горизонтального изображения со средним разрешением 640×512 эта величина не превышает 5–10% от возможной дальности. В статье проведено имитационное моделирование и продемонстрирован подход по созданию фотограмметрических зон, относительно которых изменяется точность координат подстилающей поверхности.

Ключевые слова: фотограмметрия, дистанционное зондирование, аэрофотоснимок, наклонная проекция, проективная геометрия

DOI: 10.31857/S0235009222030039

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие систем дистанционного зондирования земной поверхности в первую очередь связано с внедрением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). БПЛА являются мощным инструментом мониторинга и освещения наземной и надводной обстановки за счет использования роботизированных аппаратных средств, а также программного обеспечения, реализующего функции искусственного интеллекта (Colomina et al., 2014). Как правило, комплексы БПЛА располагают датчиками, имеющими различные физические принципы сканирования (радары в режиме синтезированной апертуры (РСА), сонары, лазерные дальномеры, фотокамеры и многое другое) (Kvasnov et al., 2021). В задачи БПЛА, помимо регистрации данных, входит решение следующих проблем:

– детектирование, сегментация и распознавание наземных объектов на основе мультиспек-

тральных характеристик, полученных с камеры (Кваснов, 2021);

– создание ортофотоснимков и панорамных изображений подстилающей поверхности (Кваснов, 2017);

– фотограмметрическое исследование объектов, расположенных вдоль траектории движения БПЛА (Colomina et al., 2014).

Последняя задача актуальна тем, что позволяет создавать виртуальные 3D-модели подстилающей поверхности, тем самым увеличивая возможности по более точному распознаванию объектов на основе масштаба и размеров сегментируемых областей. Использование фотограмметрии для анализа карт является очень эффективным, быстрым, дешевым и безопасным методом, особенно он позволяет проводить съемку и наблюдение за объектами без физического контакта (Лобанов, 1984). С широким использованием компьютерного программного обеспечения, основанного на

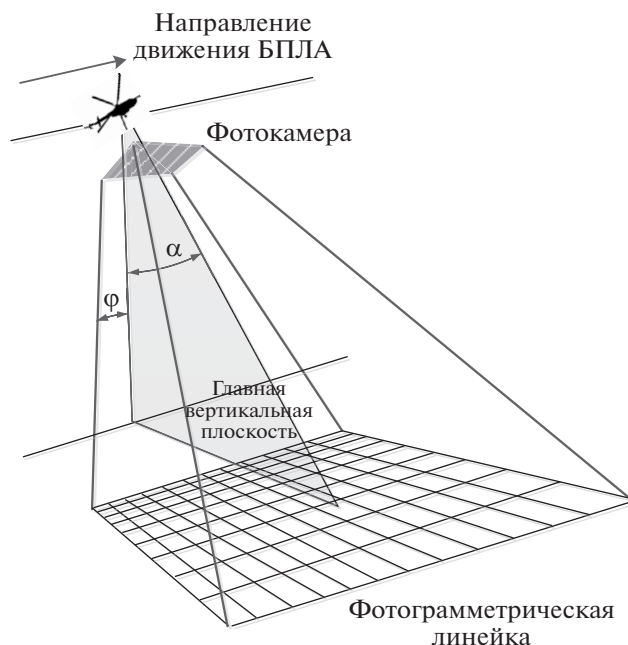


Рис. 1. Мониторинг и оценка подстилающей поверхности при помощи фотограмметрической линейки.

математических моделях, эту технологию стало выгодно применять для количественного измерения планов местности и карт (рис. 1).

Одной из важных прикладных задач фотограмметрии остается оценка точности координат в случае мониторинга наземной и надводной обстановки. Дело в том, что потенциальная точность зависит от ряда факторов:

- погрешности измерений местоположения камеры навигационными средствами БПЛА (высота полета, угол места);
- технических характеристик камеры (разрешение, фокусное расстояние, глубина съемки);
- рельефа подстилающей поверхности (мониторинг ровной поверхности, наличие возвышенностей и низин).

В этой области знаний существует ряд проблем (Liu et al., 2021). Во-первых, “пассивное” дистанционное зондирование фотокамерой не способно корректно оценить рельеф местности, поэтому полученные результаты могут существенно отличаться от истинных значений (Shen et al., 2015). Наиболее оптимальным решением является применение инфракрасной камеры как эффективного дальномерного инструмента (Telling et al., 2017; Кваснов, 2020). Другая проблема заключается в том, что дисторсия изображений, кривизна Земли и рефракция волн в видимом диапазоне также влияют на точность привязки координат. Очевидно, что фотограмметрия надводной поверхности обладает преимуществом по причине отсутствия рельефа местности.

Существенной проблемой остается недостаточная точность измерений координат на уровне

линии горизонта, оцениваемого на основании пространственного положения БПЛА и технических характеристик камеры, используемых для съемки. Данная проблематика освещена в научном исследовании (Shen et al., 2015), где рассматривается геопривязка фотоизображений с наклонной проекцией к участку местности. Пространственное положение объектов земной поверхности с учетом особенностей аэрофотосъемки проработано в следующих научных изданиях по фотограмметрии (Гаврилова и др., 2016; Обиралов и др., 2006). К сожалению, отечественные научные работы крайне скудны в этой области (Хлебникова и др., 2018).

В зарубежных работах более глубоко и широко представлены данные исследования. Прямая пространственная привязка наклонных и вертикальных изображений в разных системах координат анализируется в статье (Shen et al., 2015). На основе установленной взаимосвязи между смещением движения камеры вдоль направления фотографирования и изменением количества пикселей между опорными точками может решаться проблема пространственного измерения координат (Hsu et al., 2011).

В работе (Zhou et al., 2021) предложен метод по выбору оптимальных изображений текстуры фасада здания (BFTI – Building Facade Texture Images), который позволяет создавать фотореалистичные 3D-объекты на основе мультиспектральной камеры БПЛА M600 Pro. Координатная привязка на основе полученных снимков с наклонной проекцией демонстрируется в исследовании (Rau et al., 2015), где основное внимание уделяется анализу “облака точек”, обеспечивающих классификацию зданий. Эффективность в этом случае достигает 82.4–91.8%.

Можно констатировать, что исследования в данной области касаются преимущественно только отдельных объектов на изображении. Согласно полученным результатам в приведенных выше работах, мы не можем проследить “эволюции” точности координат подстилающей поверхности, ограниченной рассматриваемой экспозицией изображения. В этом смысле вызывает интерес исследование, посвященное анализу зависимостей между двумерными координатами изображения и реальными трехмерными координатами Земли, фиксируемыми камерой БПЛА.

Цель данной работы – оценка потенциальной точности измерений надводной поверхности при помощи фотограмметрической камеры БПЛА, осуществляющей мониторинг под заданным наклонным углом проекции. Требуется численно оценить изменение координат в контексте проекционного изображения, полученного для съемки линии горизонта с заданным фокусным расстоянием. Таким образом, научная новизна работы

Таблица 1. Технические характеристики камер видимого диапазона

Производитель и модель	Формат	Разрешение (МП)	Размер, мм ²	Размер пикселя, мкм
Hasselblad	MF	CCD	53.7	6.0
Sony	SF	CMOS	23.5	3.9
NEX-7	MILC	24.3	15.6	—
Ricoh	SF	CMOS	23.6	4.8
GXR A16	IUC	16.2	15.7	—

обоснована впервые учтенным условием наличия линии горизонта, что не рассматривается в других работах, посвященных исследуемой задаче.

Стоит отметить, что на сегодняшний день существуют готовые программные продукты, обеспечивающие решение задач по созданию 3D-моделей земной поверхности на основе облака точек. В частности, программа Agisoft PhotoScan, которая позволяет обеспечивать точность только при тщательном подборе параметров обработки (Хабарова и др., 2019). Из программных продуктов для БПЛА, обеспечивающих работу с ортофотопланами, следует отметить Pix4Dmapper. Для простых решений, использующих гражданские фотокамеры, применяется программа “Contex Capture”. В настоящее время перспективной технологией является применение облака точек, полученных в результате фотограмметрических измерений, для классификации наземных объектов (Rau et al., 2015).

Важно отметить, что все предложенные программные продукты объединяет общая особенность: фотографирование подстилающей поверхности производится для малых углов места (не более 30 град). Очевидно, что это связано непосредственно с отсутствием исследований, касающихся фотограмметрической области для больших углов места вообще, и области вдоль линии горизонта в частности. Таким образом, актуальность предложенного исследования вполне очевидна и ее прикладной характер способствует развитию направления “дальней” фотограмметрии в реальных программных продуктах.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Известно, что современные комплексы БПЛА обладают достаточно хорошими техническими характеристиками в оценке стабилизации положения, позволяющей удерживать летательный аппарат в точке с погрешностью полметра по высоте и один метр по горизонтали (Хабарова и др., 2019). Учитывая тот факт, что расчет координат ведется для наклонной проекции со значениями угла места более 30 град, потенциальная точность фотограмметрических измерений определяется в первую очередь ориентацией камеры и качеством бортовой оптики. Исходя из этого, рассмотрим

наиболее часто используемые типы фотограмметрических камер.

Для создания фотоизображений подстилающей поверхности в настоящее время используются фотокамеры различных конструктивных исполнений и функционального назначения. Можно выделить следующие типы камер (Colomina et al., 2014):

- камеры видимого диапазона малого формата и среднего формата (Phase One, iXA 180, Trimble);
- мультиспектральные камеры для БПЛА (Tertracam, MiniMCA-6, Condor-5 UAV-285);
- гиперспектральные камеры для БПЛА (Rikola, Headwall Photonics);
- тепловизионные камеры для БПЛА (FLIR, TAU 2 640).

Наиболее распространенными и востребованными камерами являются камеры видимого диапазона, для которых существует ряд основных характеристик, приведенных в табл. 1.

Для большинства представленных в таблице камер характерна высокая скорость кадрирования снимков (до 250 мкс) (Colomina et al., 2014). Это позволяет делать более точный анализ изображений даже при вращении камеры. В то же время порядок размера пикселя в несколько микрон (табл. 1) обеспечивает погрешность измерений не более 0.05 м для проекционных снимков с БПЛА на высоте до 500 м с фокусным расстоянием 100 мм. Тем не менее основными проблемами фотограмметрии остается отклонение от плоскости изображения ввиду рельефа местности и различия в масштабе перекрывающихся изображений вращательного и поступательного движения БПЛА (Кваснов, 2017). По этой причине мы будем рассматривать только гладкую ровную подстилающую поверхность (поля, луга, невысокие лесные массивы), где градиент рельефа местности не значителен.

Математическая постановка задачи

В основе создания фотограмметрии, как инструмента восстановления 3D-объектов и измерения их параметров, лежит так называемая проективная геометрия. Как известно, при проектировании точек одной плоскости на другую не каждая точка плоскости имеет образ на другой



Рис. 2. Последовательность шагов по определению точности координат.

плоскости. Это обстоятельство привело к необходимости по внедрению в метрику евклидовой плоскости, так называемых бесконечно удаленных (несобственных) точек. Такая постановка задачи приводит к понятию проективной геометрии, в которой все рассматриваемые координаты должны быть однородными.

Будем рассматривать однородные координаты, которые фиксируют исследуемую подстилающую поверхность для пространства реальной земной поверхности (U) и пространства точек на фотоснимке (W). Оба пространства не меняют своего размера при умножении на одно и то же ненулевое число. Таким образом, для любых двух упорядоченных наборов из $(n+2)$ координат имеем $\{p_0, p_1, \dots, p_{n+1}\} \in P(U)$, $\{q_0, q_1, \dots, q_{n+1}\} \in P(W)$, (1) в каждом из которых никакие $(n+1)$ точки не лежат в одной гиперплоскости. Существует единственный линейный изоморфизм $F: U \rightarrow W$ (с точностью до пропорционального коэффициента), такой что $\bar{F}(p_i) = q_i$ при всех i . Поставим задачу о нахождении этого изоморфизма F в виде аналитической зависимости для конечного набора значений $p \in \mathbb{R}$ и $q \in \mathbb{R}$. (p принадлежит R ; q принадлежит R).

Под линейным изоморфизмом мы понимаем преобразование объекта (точек реальной земной поверхности) в заданном гиперпространстве, для которого положение центральной проекции (точек фотоснимка) остается неизменным. Другими словами, линейный изоморфизм определен ко-

эффициентом пропорциональности, иначе фокусным расстоянием для размерности 3.

Естественно, что изменение фокусного расстояния приводит к трансформации системы координат проективной геометрии, поэтому наиболее эффективным способом остается анализ фотogramметрических изображений в декартовой системе координат с фиксированным значением фокусного расстояния.

В исследовании мы сделаем следующие допущения:

- будем рассматривать одиночный фотоснимок с центральной проекцией, полученный БПЛА на заданной высоте с заданным углом места;
- влияние рефракции в видимом диапазоне частот не существенно, в том числе по причине относительно небольших высот полета БПЛА;
- применяемая камера использует видимый диапазон света, который формирует изображение в градации серого цвета 8 бит.

Предложенная математическая постановка задачи требует определенного алгоритма по ее реализации. Будем проводить анализ на основе последовательных шагов, описанных в блок-схеме на рис. 2.

В общем случае точность оценки координат вдоль подстилающей поверхности определяется корректным описанием изоморфизма F в терминах аналитической модели (общее решение задачи), а в частном случае зависит от ряда условий, которые могут быть опущены ввиду их малого влияния на точность измерений, либо отнесены к

особенностям работы и функционирования БПЛА (частное решение задачи).

Аналитическое решение задачи

Рассмотрим центральную проекцию изображения P в декартовой системе координат для некоторой произвольной точки снимка a и точки местности A (рис. 3). Пусть дана система координат $Ox_0y_0z_0$, относительно которой производится фотосъемка. Система координат $Ox_sY_sZ_s$ привязана к полученному фотоизображению P .

Точка A соответствует на снимке точке a . Поскольку системы координат коллинеарные, то отображение этих точек происходит с точностью до некоторого постоянного коэффициента – фокусного расстояния: $f : A \rightarrow a$. В общем случае решение задачи об определении координаты точки местности строится на основе уравнений (Лобанов, 1984):

$$\begin{cases} X - X_s = (Z - Z_s) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \\ Y - Y_s = (Z - Z_s) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \end{cases}, (2)$$

где x_0 и y_0 – начальное положение систем координат снимка $Ox_sY_sZ_s$ относительно некоторой фиксированной точки o для снимка P .

x и y – координаты точки a на снимке; f – фокусное расстояние снимка;

a_i, b_i, c_i – направляющие косинусы, зависящие от углов внешнего ориентирования.

Известно, что при помощи углов Эйлера (или направляющие косинусы) можно описать последовательную комбинацию по вращению объекта (фотокамеры) вокруг собственного центра (Кваснов, 2015). Матрица поворота будет выражаться через коэффициенты a_i, b_i, c_i , которые используют для уравнения проективной плоскости. Тогда необходимые нам направляющие косинусы будут выражены следующим образом:

$$M = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix};$$

$$\begin{cases} a_1 = \cos(\alpha) \cos(\chi) + \sin(\alpha) \sin(\omega) \sin(\chi) \\ a_2 = -\cos(\alpha) \sin(\chi) - \sin(\alpha) \sin(\omega) \cos(\chi) \\ a_3 = -\sin(\alpha) \cos(\omega) \\ b_1 = \cos(\omega) \sin(\chi) \\ b_2 = \cos(\omega) \cos(\chi) \\ b_3 = -\sin(\omega) \\ c_1 = \sin(\alpha) \cos(\chi) + \cos(\alpha) \sin(\omega) \sin(\chi) \\ c_2 = -\sin(\alpha) \sin(\chi) + \cos(\alpha) \sin(\omega) \cos(\chi) \\ c_3 = \cos(\alpha) \cos(\omega) \end{cases}, (3)$$

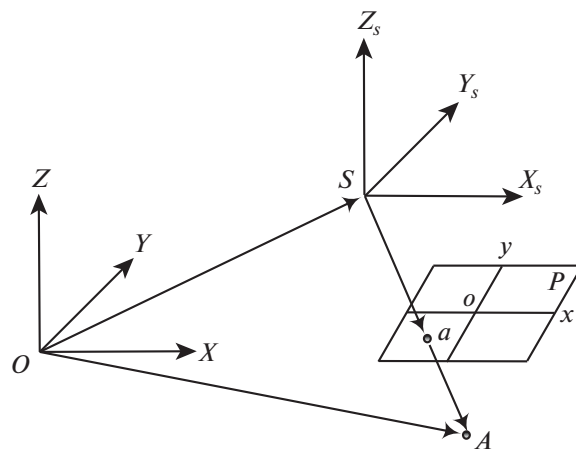


Рис. 3. Системы координат для фотограмметрических измерений.

где α – угол прецессии или угол вращения снимка вокруг вертикальной оси;

ω – угол нутации или угол поворота снимка вокруг горизонтальной оси;

χ – угол собственного вращения или поворот вокруг перпендикуляра к снимку.

Рассмотрим случай, когда камера БПЛА имеет определенный наклон, т.е. не нулевой угол нутации $\omega = \alpha \neq 0$. Согласно рис. 2 мы будем полагать, что вращение происходит вдоль оси SX_s . При этом ось Ox на снимке будет являться главной горизонталью, а ось Oy – главной вертикалью. В этом случае коэффициенты углов поворота будут выражаться $a_1 = 1, a_2 = 0, a_3 = 0, b_1 = 0, b_2 = \cos(\alpha), b_3 = -\sin(\alpha), c_1 = 0, c_2 = \sin(\alpha), c_3 = \cos(\alpha)$, а линейные координаты будут $x_0 = y_0 = 0, X_s = Y_s = Z_s = 0$. Тогда уравнения (3) преобразуются к следующему виду:

$$\begin{cases} X = H \frac{x}{f \cos(\alpha) - y \sin(\alpha)} \\ Y = H \frac{f \sin(\alpha) + y \cos(\alpha)}{f \cos(\alpha) - y \sin(\alpha)} \end{cases}, (4)$$

Начало отсчета в системе координат снимка совпадает с центром фотоизображения, а координаты точек местности X и Y отсчитываются относительно точки надира, полученного в результате опущенного перпендикуляра из точки S на поверхность Земли. Из уравнений (4) можно установить, что вдоль основной вертикали Oy координата местности является функцией вертикальной координаты фотоизображения, фокусного расстояния и высоты $Y = F(y, f, H)$, а для поперечной $X = F(x, y, f, H)$. Таким образом, на всех поперечных горизонталях снимка относительно главной горизонтали ox (рис. 2) координата мест-

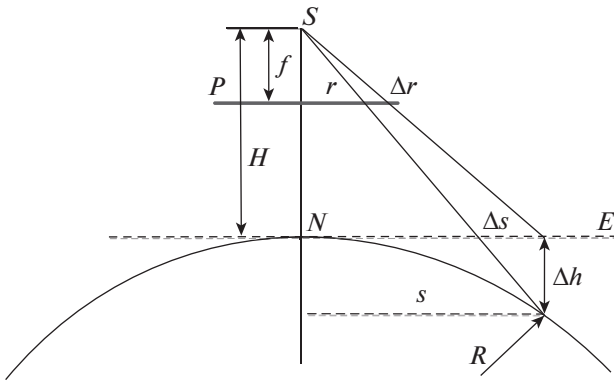


Рис. 4. Проекционное смещение изображения.

ности Y будет постоянной. В поперечном направлении смещение координат местности обусловлено влиянием как продольной, так и поперечной координаты. Следовательно, анализ продольного направления измерений можно осуществлять только вдоль главной вертикали. В дальнейшем поперечное направление мы исключим из рассмотрения, так как предел сходимости $\lim_{y \rightarrow y_{cp}} Y \gg \lim_{y \rightarrow y_{cp}} X$.

Влияние кривизны Земли

Рассмотрим случай, когда одиночный снимок получен в горизонтальной проекции. При этом его система координат привязана к точке расположения фотокамеры в точке S на высоте H относительно поверхности Земли (рис. 4).

На рис. 4 плоскость P является касательной к точке, где расположен БПЛА, и параллельна некоторой воображаемой плоскости E , являющейся касательной к точке надира N . Влияние кривизны Земли будет проявляться на смещении координаты точки r снимка на некоторую величину Δr , как если бы падающий луч достигал воображаемой плоскости E на расстоянии s , отстоящий от реальной поверхности Земли на величину смещения Δs и высоты Δh .

Будем считать, что рефракция не вносит сколько-либо существенного влияния на смещение точки. Тогда смещение точки фотоснимка, вызванное кривизной Земли, рассчитывается согласно выражению (Лобанов, 1984):

$$\Delta r = \frac{H}{2R} \frac{r^3}{f^2}. \quad (5)$$

В работе (Лобанов, 1984) указывается, что данное смещение частично компенсируется рефракцией света. Тем не менее мы рассмотрим случай, когда рефракция минимальна и изображение получено под заданным углом α . В этом случае вы-

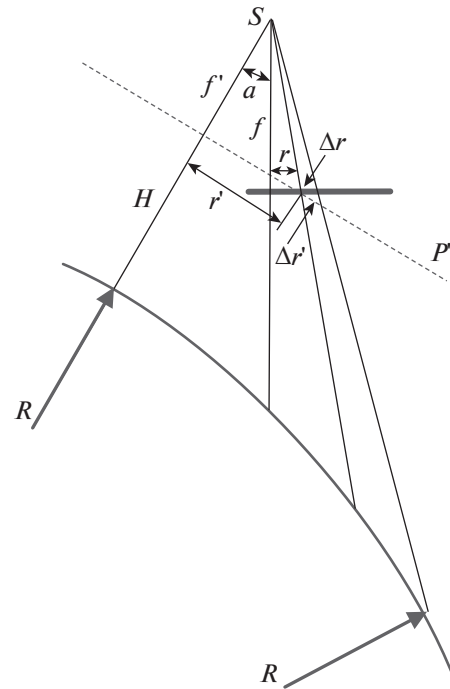


Рис. 5. Влияние кривизны земли и угла наклона камеры на искажение снимка.

ражение (5) можно преобразовать согласно подходу, предложенному в работе (Zhao et al., 2014). Каждая отметка на изображении может быть преобразована, согласно матрице поворота в плоскости главной вертикали:

$$\begin{bmatrix} r' \\ f' \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} r \\ f \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $M = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$ – матрица поворота.

В результате мы получаем проекцию точек фотоснимка (r') и фокусного расстояния (f') в так называемой проекционной плоскости P' . Вследствие вращения приведенное фокусное расстояние сокращается, а расстояние от проекционной точки до центра изображения (приведенная точка фотоснимка) увеличивается (рис. 5).

Найдем максимально возможный размер проекционного изображения с фокусным расстоянием f' , при котором на заданной высоте H будет просматриваться линия горизонта. Для этого учтем, что максимальный угол наклона камеры к линии горизонта $\alpha_{\max} = \arcsin\left(\frac{R}{R+H}\right)$, тогда:

$$r'_{\max} = f' \times \operatorname{tg}(\alpha_{\max}) = f' \times \operatorname{tg}\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+H}\right)\right) \quad (7)$$

или после упрощений:

$$r_{\max} = f \left(\frac{\gamma}{\sqrt{1 - \gamma^2}} \right), \quad (8)$$

где $\gamma = \frac{R}{R + H}$ — относительная высота полета.

При определенном наклоне камеры (θ) на изображении будет появляться линия горизонта. Это условие можно зафиксировать согласно выражению:

$$\theta \geq \alpha + \arctg \left(\frac{r}{f} \right), \quad (9)$$

где α — угол нутации (угол наклона камеры);

r — вертикальная координата точки снимка относительно центра изображения;

f — фокусное расстояние.

Последний этап — обратная трансформация, которая позволяет оценить сдвиг на наклонном снимке. Преобразование смещения проекционного смещения $\Delta r'$ к смещению наклонного снимка Δr выполняется согласно:

$$\Delta r = \frac{\Delta r' \gamma}{\sin(\alpha) + \gamma \cos(\alpha)}, \quad (10)$$

где $\gamma = \frac{f'}{r' + \Delta r'}$ — приведенный угол до заданной точки подстилающей поверхности.

Был проделан анализ относительной погрешности вертикальной координаты снимка $\left(\frac{\Delta r}{r} \right)$ от высоты наблюдения (H) и угла наклона камеры (α). Фокусное расстояние 0.1 м фиксировалось относительно геометрического центра фотоснимка. Исследования показали, что влияние крутизны Земли на точность фотограмметрической оценки подстилающей поверхности носит нелинейный характер на небольших высотах до 10000 м (рис. 6).

Для определенных углов наклона камеры кривая зависимости сходится к фиксированному значению. Это значение определяется неравенством (9) и прогнозирует появление линии горизонта на снимке относительно его главной оси. В ходе исследований было также установлено, что крайние точки снимка имеют более высокую тенденцию к смещению, чем центральные. Это объясняется изменением крутизны функции арктангенса при увеличении его аргумента, согласно выражению (9).

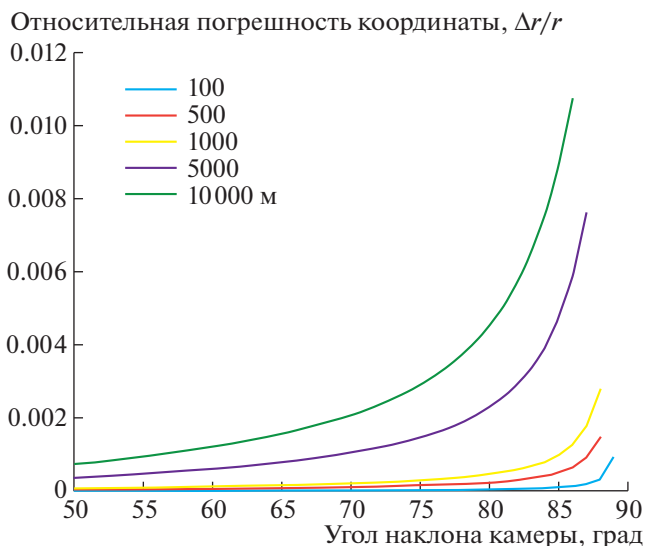


Рис. 6. Влияние угла наклона камеры на относительную погрешность вертикальной координаты для разной высоты точки наблюдения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Было проведено моделирование погрешности измерений координат для участков местности, параллельных линии горизонта и сходящихся к ней. Полагалось, что камера фиксировала подстилающую поверхность под углом 66° относительно перпендикуляра, опущенного в точку надира. Характеристики изображения:

- фокусное расстояние — 0.15 м;
- количество пикселей вдоль горизонтали — 1024;
- количество пикселей вдоль вертикали — 512;
- разрешение фотоизображения — 96 Пикселей/дюйм.

Полученные результаты

Точность измеренных координат проводилась на основе выражений (4). Расстояние до рассматриваемой точки снимка было получено при различных фокусных расстояниях и углах наклона камеры. Высота БПЛА фиксировалась на 500 м. Угол наклона был выбран для двух случаев: линия главной горизонтали совпадает с линией горизонта $\alpha = 72^\circ$ (рис. 8 и 10), верхний край снимка совпадает с линией горизонта $\alpha = 88^\circ$ (рис. 7 и 9). Фокусные расстояния были выбраны $f = 0.05$ м (рис. 6 и 7) и $f = 0.2$ м (рис. 9 и 10).

Из графиков можно установить, что смещения горизонтальных координат снимка несущественно деформируются по сравнению с главной вер-

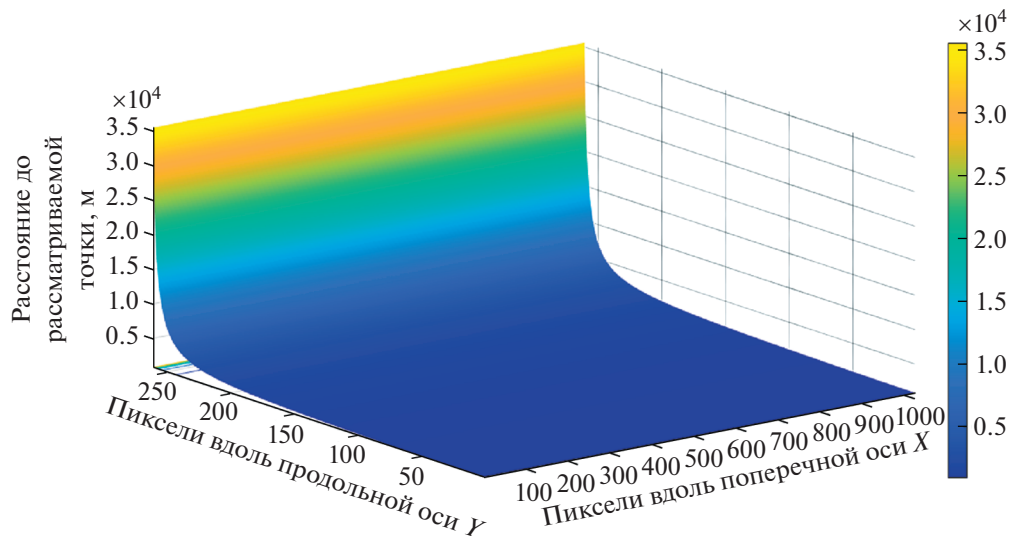


Рис. 7. Измерение расстояний вдоль подстилающей поверхности до линии горизонта (фокусное расстояние $f = 0.05$ м; высота полета $h = 500$ м; угол наклона камеры $\alpha = 88^\circ$).

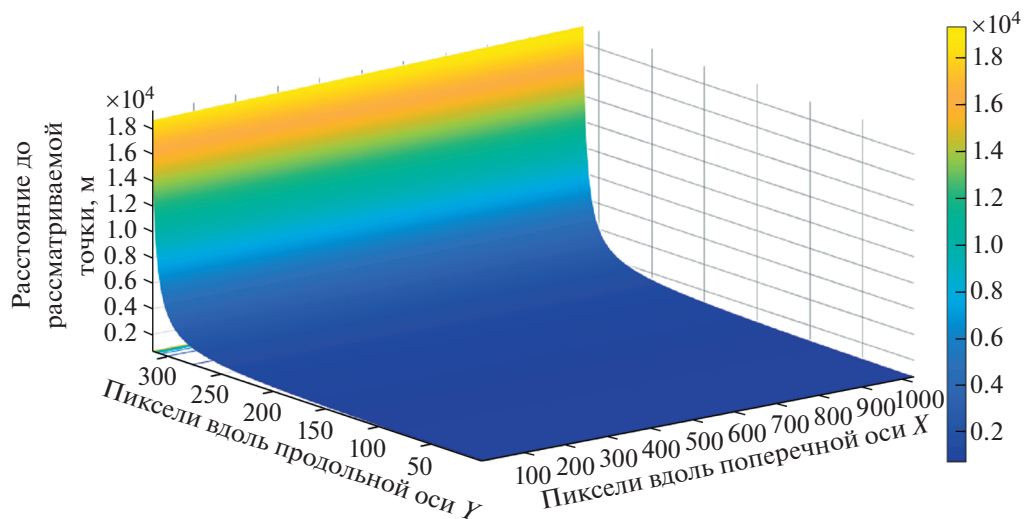


Рис. 8. Измерение расстояний вдоль подстилающей поверхности до линии горизонта (фокусное расстояние $f = 0.05$ м; высота полета $h = 500$ м; угол наклона камеры $\alpha = 72^\circ$).

тикалю, где присутствует “схождение” лучей к некоторой точке центральной проекции.

Основной момент в том, что изменение угла наклона камеры существенно сокращает точность измерений координат вблизи линии горизонта. Предельное оценочное значение $r_{\max} = 39223$ м получено для случая, когда главная горизонталь камеры совпадает с линией горизонта. При совпадении линий горизонта с верхней границей снимка эта величина достигает $r_{\max} = 22456$ м. В обоих

вариантах полученные значения оказались существенно ниже потенциального значения, рассчитанного согласно $r = 3.57\sqrt{H} \approx 79.8$ м.

Вторым важным моментом является более равномерное изменение координат вдоль главного вертикала при увеличении фокусного расстояния. При этом добиться более точного результата предельного значения удаленности координат не представляется возможным, ввиду потенциально низкого разрешения камеры.

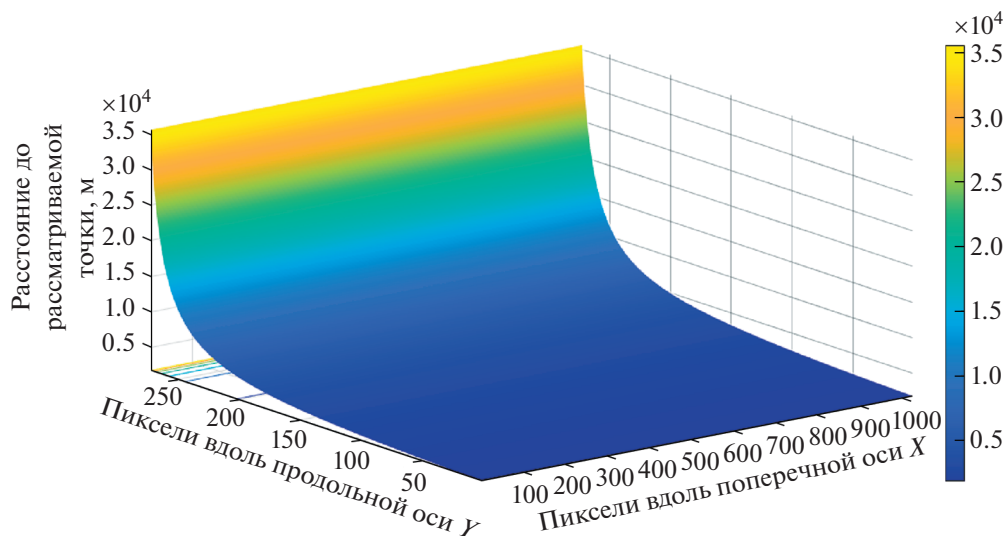


Рис. 9. Измерение расстояний вдоль подстилающей поверхности до линии горизонта (фокусное расстояние $f = 0.2$ м; высота полета $h = 500$ м; угол наклона камеры $\alpha = 88^\circ$).

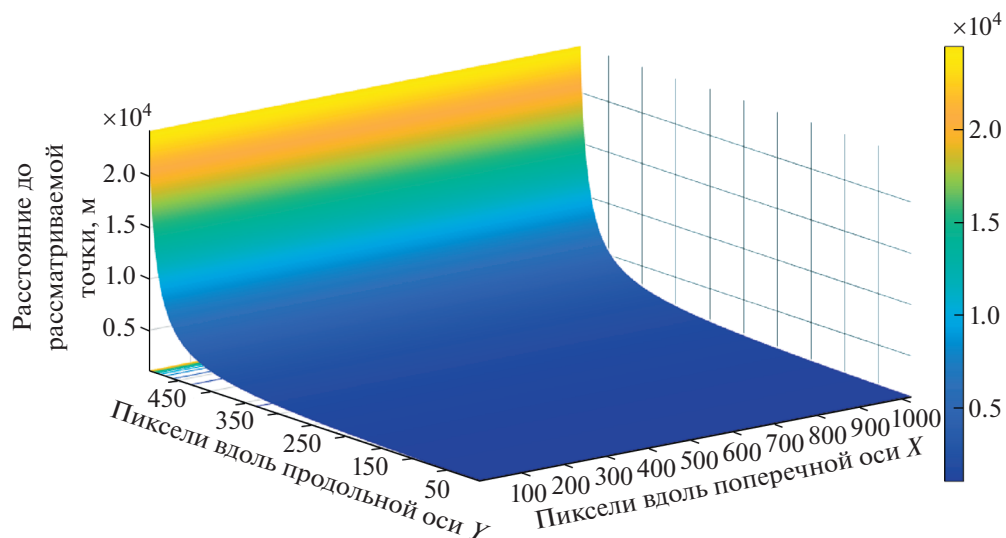


Рис. 10. Измерение расстояний вдоль подстилающей поверхности до линии горизонта (фокусное расстояние $f = 0.2$ м; высота полета $h = 500$ м; угол наклона камеры $\alpha = 72^\circ$).

ОБСУЖДЕНИЯ

В ряде зарубежных работ существуют исследования, связанные с оценкой точности фотограмметрических измерений (Lu et al., 2012). Так, измерение дистанции до объектов на основе фотоизображений представлено в работе (Hsu et al., 2011), где экспериментальные исследования проведены для небольших расстояний (до 2 м) с использованием CCD-камеры. Результаты работы

показали, что ошибка измерений дальности начинает резко возрастать на определенной дистанции для заданного угла наклона 30 град. Причем экспериментальная точность намного ниже теоретической точности в 3–5 раз. Это подтверждает наши результаты (рис. 7–10), но требует проведения экспериментальных подтверждений.

На основании полученных математических соотношений (4) и (9) был реализован программ-

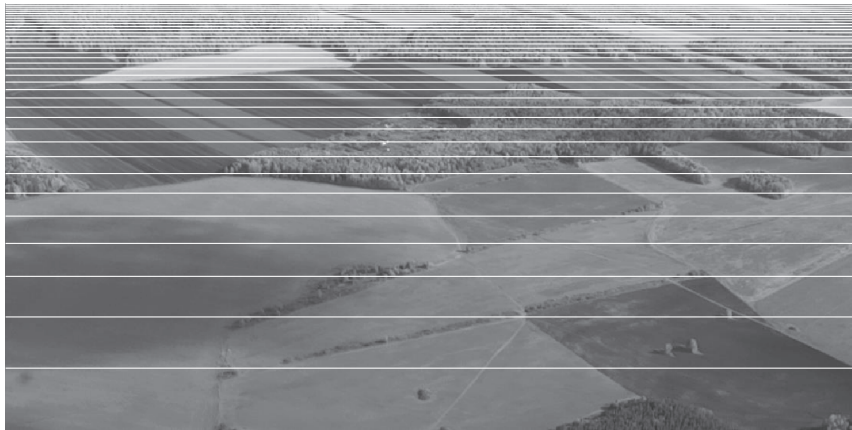


Рис. 11. Точность фотограмметрических измерений подстилающей поверхности на примере земной поверхности (фокусное расстояние $f = 0.05$ м; высота полета $h = 350$ м; угол наклона камеры $\alpha = 33^\circ$).



Рис. 12. Точность фотограмметрических измерений подстилающей поверхности на примере земной поверхности (фокусное расстояние $f = 0.05$ м; высота полета $h = 550$ м; угол наклона камеры $\alpha = 83^\circ$).

ный код для построения фотограмметрической линии координат для произвольных фотоизображений (рис. 11 и 12). В качестве инструмента использовался пакет программ Matlab 2020, на платформе которого были смоделированы сценарии для случая, когда камера имеет малый угол наклона $\alpha = 33^\circ$ (рис. 11) и когда большой угол наклона $\alpha = 83^\circ$ (рис. 12), вследствие чего линия горизонта совпадает с главной горизонталью фотоснимка.

Количество измерительных линий вдоль главной вертикали для обоих рисунков одинаково и равно 21. При этом их частота — нелинейная, вследствие особенностей проекционной геометрии, и возрастает более существенно для случая, когда присутствует линия горизонта. Фактически

мы можем измерять только 90% от расстояния до линии горизонта на снимке, т.е. реальную подстилающую поверхность в диапазоне 5–10 км из возможных 83 км. Эти результаты совпадают с теоретическими результатами, продемонстрированными на рис. 6–9. Очевидно, дальнейшее развитие методики фотограмметрических измерений связано с совершенствованием качества получаемых изображений (разрешение снимка, качество оптики — фокусное расстояние, яркость светопередачи). Для развития наземной фотограмметрии должны быть учтены неровности подстилающей поверхности (особенно горная местность) и влияние рефракции для камеры видимого диапазона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследуется вопрос о потенциальной точности при измерении координат надводной поверхности при помощи фотограмметрических методов дистанционного зондирования на основе изображения, полученного для заданного угла наклона. Теоретическая проблема фотограмметрии относится к так называемой проективной геометрии, где исследуемые объекты рассматриваются в однородных координатах, коэффициентом для которых выбирается фокусное расстояние камеры.

Наиболее сложным случаем представляется анализ измерений в зоне, расположенной в непосредственной близости от линии горизонта. В исследовании показано, что влияние крутизны Земли не превышает величины 1% для высоты измерений не более 10 км. В то же время точность измерений вдоль главной вертикали существенно падает при приближении к линии горизонта. Таким образом, фактическое измерение координат ограничено диапазоном 5–10% от возможной дальности. Результаты, полученные аналитическим путем, подтвердили свою достоверность на основе имитационного моделирования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению “Передовые цифровые технологии” СПбПУ (соглашение № 075-15-2020-934 от 17.11.2020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврилова Л.А., Лимонов А.Н. *Прикладная фотограмметрия: учебник для вузов*. М.: Академический проект, 2016. 255 с.
- Кваснов А. В. Оценка построения трассы радиолокационной цели неподвижным лучом АФАР в дальней зоне наблюдения. *Радиотехника*. 2017. № 2. С. 4–12.
- Кваснов А. В. Определение дальности до источника радиоизлучения по энергопотенциалу принимаемого сигнала. *Датчики и системы*. 2020. Т. 243. № 1. С. 29–34.
- Кваснов А.В. Исследование информационной полноты радиолокационных данных в задачах классификации точечных воздушных объектов. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. № 11.
- Кваснов А.В. Синтез оптимального регулятора для управления движением бортовой радиолокационной системы при отслеживании сверхзвуковых целей. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2015. Т. 13. № 2. С. 55–62.
- Лобанов А.Н. *Фотограмметрия: учебник для вузов* (изд. 2-е изд. перераб. и доп.). М.: Недра, 1984. 552 с.
- Обиралов А.И., Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. *Фотограмметрия и дистанционное зондирование*. М.: Колосс, 2006. 334 с.
- Хабарова И.А., Хабарова Д.А., Яворская И.Д., Иванов И.Н. Обзор современных достижений в фотограмметрии и аэрофотосъемке. *Международный журнал прикладных наук и технологий “Integral”*. 2019. Т. 4. № 2. С. 15–33.
- Хлебникова Т.А., Опритова О.А., Аубакирова С.М. Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 1. № 4. С. 32–37.
- Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2014. № 92. P. 79–97.
- Hsu C.C.J., Lu M.C., Lu Y.Y. Distance and Angle Measurement of Objects on an Oblique Plane Based on Pixel Number Variation of CCD Images. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2011. V. 60. № 5. P. 1779–1794.
- Kvasnov A.V., Shkodyrev V.P. A classification technique of group objects by artificial neural networks using estimation of entropy on synthetic aperture radar images. *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2021. V.10. № 1. P. 127–134.
- Liu J., Xu W., Guo B., Zhou G., Zhu H. Accurate Mapping Method for UAV Photogrammetry Without Ground Control Points in the Map Projection Frame. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. 2021. V. 59. № 11. P. 9673–9681.
- Lu M.C., Hsu C.C., Lu Y.Y. Image-Based System for Measuring Objects on an Oblique Plane and Its Applications in 2-D Localization. *IEEE Sensors journal*. 2012. № 12. P. 2249–2261.
- Rau J., Jhan J., Hsu Y. Analysis of Oblique Aerial Images for Land Cover and Point Cloud Classification in an Urban Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. N 53 (3). P. 1304–1319.
- Shen X., Zhang Y., Li Q. Accurate direct georeferencing of aerial imagery in national coordinates. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. № 105. P. 13–18.
- Telling J., Lyda A., Hartzell P., Glennie C. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*. 2017. № 169. P. 35–68.
- Zhao H., Zhang B., Wub C., Zuo Z., Chen Z., Bi J. Direct georeferencing of oblique and vertical imagery in different coordinate systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*/ 2014. № 95. P. 122–133.
- Zhou G., Bao X., Ye S., Wang H., Yan H. Selection of Optimal Building Facade Texture Images From UAV-Based Multiple Oblique Image Flows. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*/ 2021. V. 59. № 2. P. 1534–1552.

Accuracy of the coordinates for underlying surface based on photogrammetric measurements of the images with an oblique projection

A. V. Kvasnov^{a, #}

^a Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), 195251 Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya, 29, Russia

[#]E-mail: Kvasnov_AV@spbstu.ru

The article presents a study on the estimation of the coordinates for the ground surface based on photogrammetric measurements using cameras with an oblique image projection. The aim of paper is analysis of multi-spectral images, which allow finding the zones with potential accuracy using photogrammetric measurements. A theoretical problem has been formed and an analytical solution for calculating coordinates has been implemented within the framework of projective geometry. It is shown that the influence of the Earth's curvature does not exceed 1% of the expected accuracy. When the longitudinal coordinate of the photograph changes to the horizon line, the measurement accuracy is significantly reduced and does not exceed 5-10% of the possible range. In the article, simulation modeling for the estimation of coordinates is carried out and the technology for creating a photogrammetric ruler for photographic images is demonstrated.

Key words: photogrammetry, remote sensing, aerial photography, oblique projection, projective geometry

REFERENCES

- Gavrilova L.A., Limonov A.N. *Prikladnaya fotogrammetriya* (izd. uchebnik dlya vuzov). [Applied photogrammetry: textbook for universities]. M.: Academic Project. 2016. 255 p. (in Russia).
- Kvasnov A.V. Otsenka postroeniya trassy radiolokatsionnoi tseli nepo-dvizhnym luchom AFAR v dal'nei zone nablyudeniya [Estimation of tracking target using a fixed beam active phased array radar in far-field region]. *Radiotekhnika* [Radio engineering]. 2017. No. 2. P. 4–12 (in Russia).
- Kvasnov A.V. Opredelenie dal'nosti do istochnika radioizlucheniya po energopotentsialu prinimaemogo signala [Method of determine the distance for radar emitting source by the energy potential of the received signal]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2020. V. 243. No. 1. P. 29–34 (in Russia).
- Kvasnov A.V. Issledovanie informacionnoj polnoty radiolokatsionnykh dannykh v zadachah klassifikatsii tochechnykh vozdukhnykh ob'ektov [Study of information completeness of radar data for air target classification]. *Zhurnal radioelektroniki* [elektronnyy zhurnal] [Journal of Radio Electronics] [electronic journal]. 2021. № 11 (in Russia).
- Kvasnov A.V. Sintez optimal'nogo regulatora dlya upravleniya dvizheniem bortovoy radiolokatsionnoy sistemy pri otslezhivani sverkhzvukovykh celej [Synthesis of optimal regulator for motion control on-board radar system for tracking supersonic purposes]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems]. 2015. V. 13. No. 2. P. 55–62 (in Russia).
- Lobanov A.N. *Fotogrammetriya: uchebnik dlya vuzov* (izd. 2-e izd. pererab. i dop.) [Photogrammetry: Textbook for universities (ed. 2nd ed. reprint. and add.)]. M.: Nedra. 1984. 552 p. (in Russia).
- Obiralov A.I., Limonov A.N., Gavrilova L.A. *Fotogrammetriya i distantsionnoe zondirovanie* [Photogrammetry and remote sensing]. M.: Koloss. 2006. 334 p. (in Russia).
- Khabarova I.A., Khabarova D.A., Yavorskaya I.D., Ivanov I.N. Obzor sovremennykh dostizhenii v fotogrammetrii i aerofototsemke [Review of modern achievements in photogrammetry and aerial photography]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii "Integral"* [International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral"]. 2019. V. 4. No. 2. P. 15–33. (in Russia).
- Khlebnikova T.A., Opritova O.A., Aubakirova S.M. Eksperimental'nye issledovaniya tochnosti postroeniya fotogrammetricheskoi modeli po materialam BPLA [Experimental studies of the accuracy of constructing a photogrammetric model based on UAV materials]. *Interexpo Geo-Sibir* [Interexpo Geo-Siberia]. 2018. V. 1. No. 4. P. 32–37 (in Russia).
- Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. № 92. P. 79–97.
- Hsu C.C.J., Lu M.C., Lu Y.Y. Distance and Angle Measurement of Objects on an Oblique Plane Based on Pixel Number Variation of CCD Images. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2011. V. 60. № 5. P. 1779–1794.
- Kvasnov A. V., Shkodyrev V.P. A classification technique of group objects by artificial neural networks using estimation of entropy on synthetic aperture radar images. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2021. V. 10. № 1. P. 127–134.
- Liu J., Xu W., Guo B., Zhou G., Zhu H. Accurate Mapping Method for UAV Photogrammetry Without Ground Control Points in the Map Projection Frame. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2021. V. 59. № 11. P. 9673–9681.
- Lu M.C., Hsu C.C., Lu Y.Y. Image-Based System for Measuring Objects on an Oblique Plane and Its Application

- tions in 2-D Localization. *IEEE Sensors journal*. 2012. № 12. P. 2249–2261.
- Rau J., Jhan J., Hsu Y. Analysis of Oblique Aerial Images for Land Cover and Point Cloud Classification in an Urban Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015. V. 53 (3). P. 1304–1319.
- Shen X., Zhang Y., Li Q. Accurate direct georeferencing of aerial imagery in national coordinates. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. № 105. P. 13–18.
- Telling J., Lyda A., Hartzell P., Glennie C. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*. 2017. № 169. P. 35–68.
- Zhao H., Zhang B., Wub C., Zuo Z., Chen Z., Bi J. Direct georeferencing of oblique and vertical imagery in different coordinate systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014. № 95. P. 122–133.
- Zhou G., Bao X., Ye S., Wang H., Yan H. Selection of Optimal Building Facade Texture Images From UAV-Based Multiple Oblique Image Flows. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021. V. 59. № 2. P. 1534–1552.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ РАДИОИМПУЛЬСОВ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОСЕНСОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ

© 2022 г. А. В. Шильцин^{1,*}, М. С. Костин¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет 119454 Москва, просп. Вернадского, 78, Россия

*E-mail: adaptox@gmail.com

Поступила в редакцию 03.02.2022 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принята к публикации 12.04.2022 г.

В работе представлены построение и анализ параметрических вариаций схем программно-численной модели сигнального повторителя сверхкоротких радиоимпульсов, а также программно-численная эмуляция и алгоритмизация стробоскопического метода регистрации и обработки радиоизображений, сформированных цифровым двойником – электродинамической моделью зондируемого объекта, представленного беспилотником самолетного типа. Предложен электрооптический метод альтернативного решения радиотехнической задачи стробоскопической регистрации и восстановления сверхкоротких радиоимпульсов наносекундной длительности с субнаносекундным разрешением, составляющих сигнатуру радиоизображения облучаемых объектов для систем радиосенсорной сигнально-томографической аутентификации. В среде Simulink разработаны программные модели инфраоптических повторителей, позволяющие численно анализировать и исследовать эффективность метода оптической регенерации радиоимпульсов при помощи схемы дробного мультиплексирования с задержанной обратной связью. Проведено моделирование радиоотклика от цифрового двойника цели, облученной гауссовским сверхкоротким радиоимпульсом в программной среде электродинамического моделирования Altair Feko. Показано, что электрооптический повторитель с шестнадцатью линиями задержки за 20 итераций способен восстановить радиоотклик от цели с коэффициентом корреляции больше 0.9 между эталонным и восстановленным импульсом при отношении сигнал–шум не менее 9 дБ.

Ключевые слова: электрооптический повторитель, СКИ-сигнал, рекуперация, радиосенсорная система, радиоизображение, импульсная характеристика

DOI: 10.31857/S0235009222030076

Освоение субнаносекундного сверхвысокочастотного диапазона открывает уникальные возможности при исследовании радиофизических свойств внешней и внутренней подповерхностной структуры материальных сред и объектов в задачах сигнально-томографического радиовидения ввиду того, что сверхширокополосность сверхкоротких радиоимпульсов позволяет с высокой точностью воспроизводить импульсные характеристики облучаемой сигнатуры зондируемых объектов (Тимановский, Пирогов, 2017; Бойков и др., 2021). При этом научно-практический интерес к электродинамическим эффектам волновой трансформации профиля отраженных от облучаемых поверхностей или прошедших через различные среды ультракоротких радиоимпульсов так или иначе ведет к поиску более совершенных и эффективных методов регистрации и преобразования сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов с целью их стробоскопического восста-

новления для дальнейшей постобработки (Радзиевский, Трифонов, 2009).

Как известно, создание регенераторов одиноким импульсов с усиленно-задержанной петлей обратной связи на базе радиотехнических решений предъявляет особые требования к обеспечению устойчивости системы, связанной с явлениями паразитных самовозбуждений в цепи регенератора (Костин и др., 2018). Отсюда для достижения надежной устойчивости системы регенерации предлагается радиофотонное преобразование радиоотклика в инфраоптический посредством амплитудной электрооптической модуляции лазерного излучения принятым радиочастотным СКИ-сигналом. Таким образом, работа посвящена созданию нового метода сигнальной рекуперации СКИ-сигнала на дробном оптическом повторителе в последовательность аутентичных импульсов для решения стробоскопической обработки радиоизображений. В то же

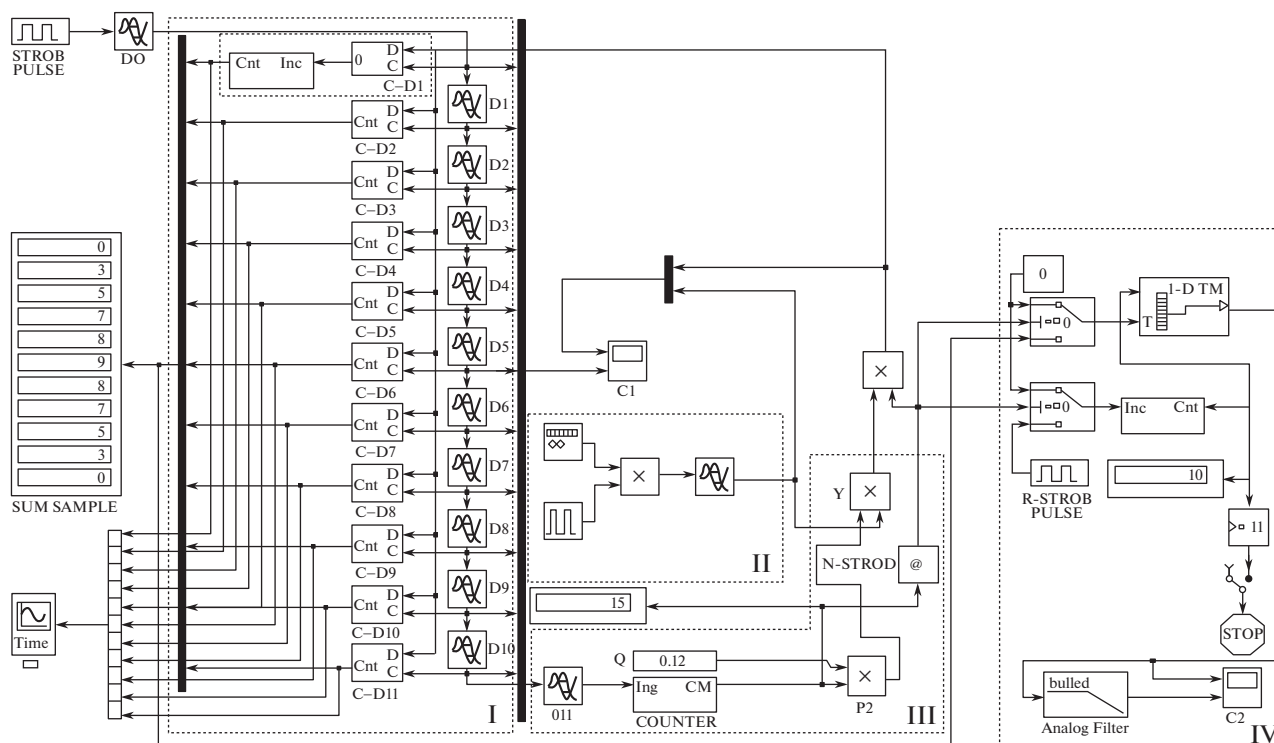


Рис. 1. Программно-численная модель СФД в среде Simulink.

время предлагаемая в работе технология строб-фрейм-дискретизации (СФД) исключает недостатки аналогового приема, в том числе высокочастотное тактирование СКИ-сигнала для взятия цифровых отсчетов (Будагян и др., 2017; Костин и др. 2018).

ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МОДЕЛИ СТРОБ-ФРЕЙМ-ДИСКРЕТИЗАТОРА

Предлагаемая программно-численная модель СФД была ранее реализована в программной среде Simulink, аналитическое описание и исследование которой подробнее рассмотрены в работе (Костин, Бойков 2021). Модель состоит из генератора импульсов заданной формы, массива элементарных линий временной задержки сигнала, массива счетчиков, компаратора и системы вывода результатов. Так, на рис. 1 представлены четыре ключевых функциональных блока: I – массив линий задержек и счетчиков; II – генератор сигналов заданной формы и повторитель СКИ-сигналов; III – компаратор; IV – система вывода результатов.

Так, особенностью рассмотренной радиотехнической модели является необходимость фиксированного стробоскопического приема для его восстановления после отражения от исследуемого объекта. Иными словами, радиоимпульс излучается столько раз, сколько уровней компаратора

необходимо для восстановления СКИ-сигнала при заданной точности (Будагян и др., 2017).

В качестве зондирующего СКИ-сигнала для получения радиоизображения объекта, принимаемого сверхширокополосной антенной, выбран биполярный гауссовский радиоимпульс – гауссиан (Лазоренко, Черногор, 2008) (рис. 2), профиль которого имеет вид:

$$S(t) = t \cdot \exp\left(-a[t - \tau/2]^2\right), \quad (1)$$

где τ – длительность СКИ-сигнала.

При этом для оценки воспроизводимости СКИ-сигнала, восстановленного СФД в данной работе, коэффициент корреляции между эталонным (реперным) и восстановленным радиоимпульсом будем считать по формуле (2)

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИООТКЛИКА ОТ ЗАДАННОГО ПРОТОТИПА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для достоверного формирования радиоизображения от облученной цели, используемого в

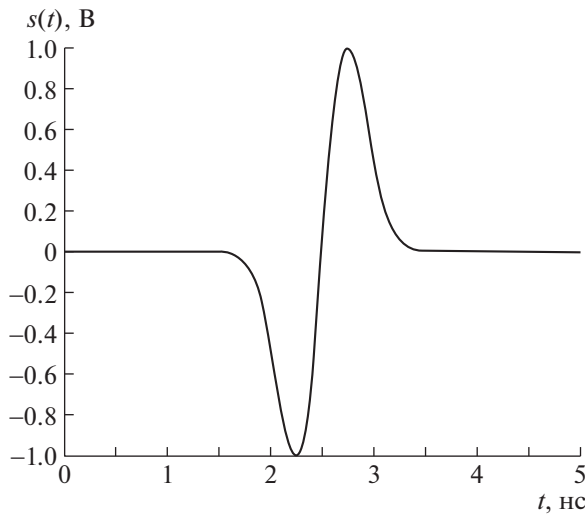


Рис. 2. Графическое представление аналитической модели гауссовского радиоимпульса. Ось ox — время в наносекундах, oy — амплитуда сигнала в вольтах.

качестве эталонного репера для корреляционной оценки воспроизводимости исходного СКИ-сигнала электрооптическим повторителем, в среде Altair Feko проведено электродинамическое моделирование по созданию цифрового двойника зондируемого объекта (Банков, Курушин, 2008).

В качестве численного метода моделирования в среде Altair Feko был выбран метод моментов, принципиально отличающийся от других представленных методов решения задач электродинамики тем, что использует не “объемный”, а “поверхностный” подход, при котором в качестве неизвестной векторной координаты используется распределение плотности поверхностных токов на проводящих поверхностях исследуемой системы (Григорьев, 2012). Искомый поверхностный ток является источником, возбуждающим поле во всей расчетной области (формулы 3.1–3.3). Таким образом, неизвестная функция определена на поверхности, а не во всем объеме, что снижает вычислительные мощности, требуемые для расчета распределения напряженности электрической компоненты поля, рассеянного объектом СКИ-сигнала.

Кроме этого, метод моментов имеет еще одно важное преимущество — при его использовании не требуется искусственное ограничение расчетной области искусственной поглощающей поверхностью при решении внешних задач электродинамики. Этими достоинствами обусловлено широкое распространение метода для векторного анализа волновых процессов рассеяния и дифракции. Так, в качестве векторной аналитики в работе используются три основные формулировки метода моментов (Григорьев, 2012):

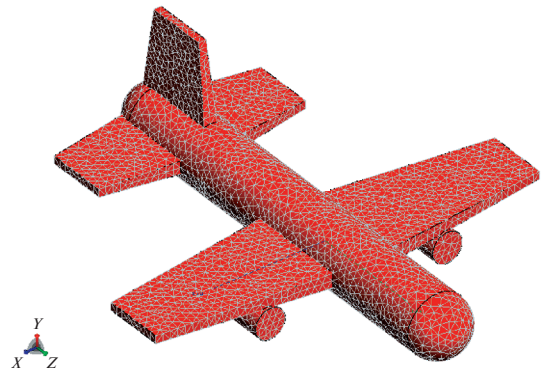


Рис. 3. Программная модель беспилотника самолетного типа модификации “Орион” в среде Altair Feko.

— уравнение для напряженности электрического поля

$$\begin{aligned} \bar{e}_n \times \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \left[\bar{J}_s^e(\bar{r}') + \frac{1}{k^2} \nabla' (\nabla' \cdot \bar{J}_s^e(\bar{r}')) \right] dS' = \\ = \frac{1}{ik\eta} \bar{e}_n \times \bar{E}^i(\bar{r}), \end{aligned} \quad (3.1)$$

— уравнение для напряженности магнитного поля

$$\begin{aligned} \bar{e}_n \times \bar{H}^i(\bar{r}) = \\ = \frac{1}{2} \bar{J}_s^e(\bar{r}) + \left[\bar{e}_n \times \int_{S'-\delta S} \nabla' G(\bar{r}, \bar{r}') \times \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' \right], \end{aligned} \quad (3.2)$$

— уравнение для электродинамических потенциалов

$$\begin{aligned} \bar{e}_n \times \bar{E}^i(\bar{r}) = \bar{e}_n \times \left[i\omega\mu \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \times \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' - \right. \\ \left. - \frac{1}{i\omega\mu} \nabla \int_{S'} G(\bar{r}, \bar{r}') \nabla' \cdot \bar{J}_s^e(\bar{r}') dS' \right]. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для создания заданного прототипа (исходного репера) в работе была выбрана и построена в среде Altair Feko программно-численная модель беспилотника самолетного типа модификации “Орион”, боковая поверхность которого представлена идеальным проводящим слоем, облучаемого СКИ-сигналом (рис. 3).

Моделирование производилось на частоте зондирования 200 МГц. Прототип облучался гауссовским радиоимпульсом длительностью 5 нс, достаточной для обеспечения пространственного разрешения по детализации элементов заданной цели.

В результате моделирования получена программно-графическая эпюра распределения напряженности электрической компоненты электромагнитного поля, рассеянного моделью беспилотника самолетного типа (рис. 4).

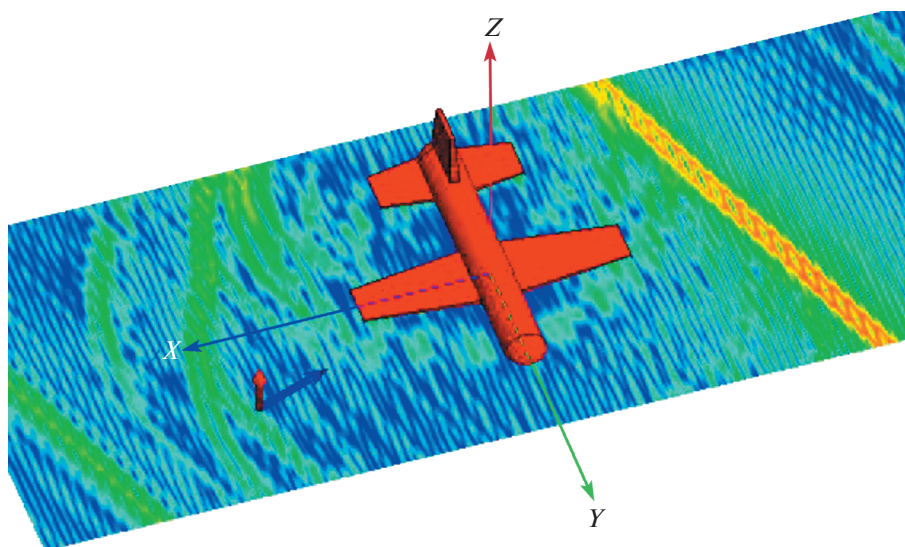


Рис. 4. Распределение напряженности электрической компоненты электромагнитного поля СКИ-сигнала, рассеянного моделью беспилотника самолетного типа.

На рисунке отчетливо виден радиоимпульс, прошедший через модель беспилотника, и отраженные радиоимпульсы — рассеянные радиоотклики, сформированные целью в результате обратного отражения СКИ-сигнала от ее боковой поверхности. Несмотря на “наносекундный” характер длительности зондирующего радиоимпульса, важно отметить, что частотно-временная детализация сформированного профиля напряженности электрической компоненты СКИ-сигнала — принимаемого от цели радиоизображения,

будет носить субнаносекундное распределение, частота верхних формант в спектре которого будет строго определена фронтами (крутизной спада и нарастания) гауссиана.

Анализируя распределения напряженности электрической компоненты обратного электромагнитного излучения вдоль оси x (рис. 5), можно заметить собственно гауссовский радиоимпульс (область 1) и отраженные от модели беспилотника радиоимпульсы (область 2), которые представляют собой сформированное в пространстве радиоизображение или исходный СКИ-сигнал, рассеянный реперной целью.

Произведем пространственно-временную селекцию интересующего радиопортрета цели (рис. 6).

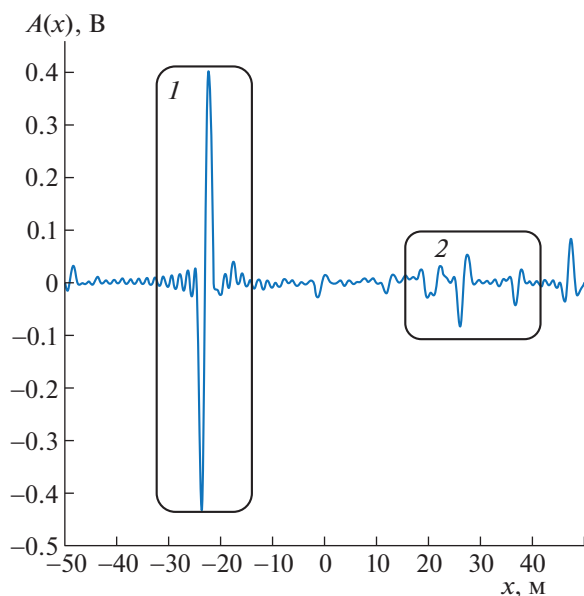


Рис. 5. Распределение напряженности электрической компоненты обратно рассеянного электромагнитного поля СКИ-сигнала вдоль оси x . Ось ox — расстояние в метрах, oy — амплитуда сигнала в вольтах.

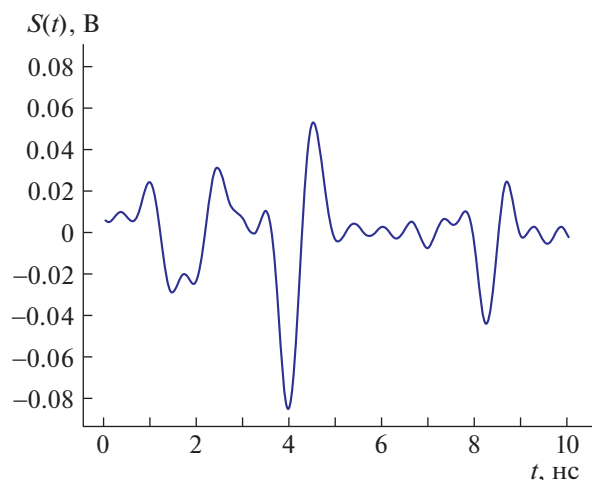


Рис. 6. Графическое представление исходного (реперного) радиопортрета беспилотника после пространственно-временной селекции. Ось ox — время в наносекундах, oy — амплитуда сигнала в вольтах.

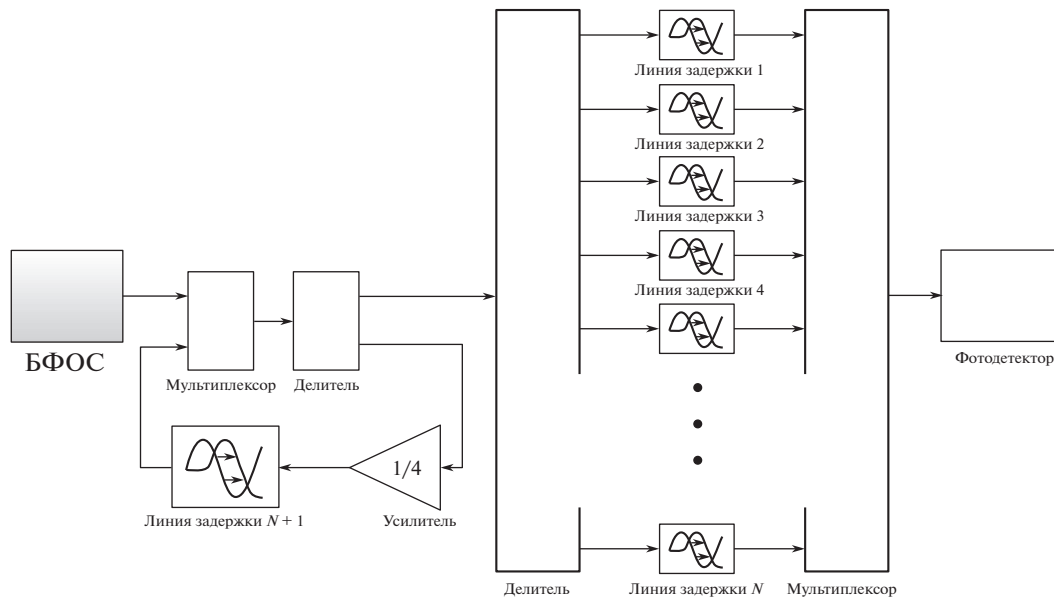


Рис. 7. Модель электрооптического повторителя СКИ-сигнала с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием.

Именно в таком виде анализируется полученный радиоотклик для оценки его воспроизводимости строб-фрейм-дискретизатором, ранее рассмотренном в работе (Костин и др., 2019), при его моделировании в среде Simulink.

ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ ИССЛЕДУЕМОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

В ходе программно-численного моделирования были исследованы конфигурации электрооптических повторителей с 8 и 16 линиями задержки, а также строб-фрейм-дискретизатор с массивом из 100 линий задержки (рис. 7) (Шильцин и др., 2020).

Передаточные функции схем электрооптического повторителя СКИ-сигнала с различными каскадами линий задержки можно описать выражениями

$$W_{8лз}(p) = \frac{1 + \sum_{i=1}^7 e^{-\tau_i p}}{1 - K_{yc} e^{-\tau_{сзз} p}}, \quad (4.1)$$

$$W_{16лз}(p) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{15} e^{-\tau_i p}}{1 - K_{yc} * e^{-\tau_{сзз} p}}. \quad (4.2)$$

Для моделирования воздействия шума на отраженный от цели СКИ-сигнал использовался аддитивный белый гауссовский шум. Кроме того, была оценена ошибка квантования. Так, при ис-

пользовании сглаживающего фильтра нижних частот удалось добиться увеличения коэффициента корреляции с 0.82 до 0.92.

На рис. 8 приведены графики зависимости коэффициента корреляции между восстановленным и эталонным (реперным) радиоимпульсом в зависимости от числа итераций восстановления при отношении сигнал-шум 9 дБ.

Из рисунка видно, что исходный СКИ-сигнал, сформированный радиооткликом беспилотника, успешно воспроизводит схема электрооптического повторителя с массивом из 16 линий задержки при 20 итерациях восстановления радиоимпульса СФД, обеспечивая корреляционную воспроизводимость свыше 0.9. При этом дальнейшее увеличение числа уровней компаратора отрицательно сказывается на корреляционной

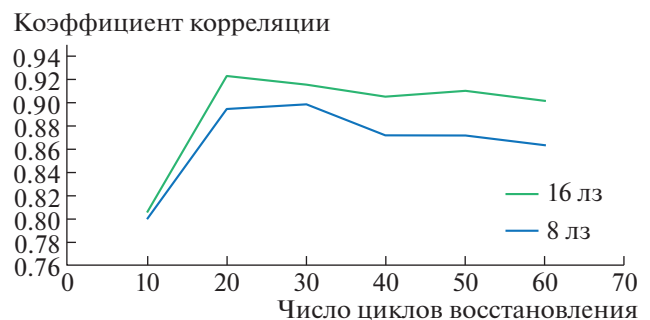


Рис. 8. Зависимость коэффициента корреляции между исходным (реперным) и восстановленным радиоимпульсом от числа стробоскопических итераций при отношении сигнал-шум 9 дБ.

воспроизводимости восстановленного СКИ-сигнала из-за накапливающихся шумов усилителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе схемы электрооптических повторителей СКИ-сигналов позволяют восстанавливать одиночный СКИ-сигнал, приближенный по корреляционной воспроизводимости к исходному реперу за однократный цикл регистрации. Проведенный параметрический анализ схем электрооптических повторителей с каскадом из 8 и 16 линий задержки показал следующие результаты: вариант схемы электрооптического повторителя с каскадом из 16 линий задержки вместе со строб-фрейм-дискретизатором с каскадом из 100 элементов задержки позволяет восстанавливать исходный СКИ-сигнал с корреляцией 0.92, однако дальнейшее увеличение количества уровней компаратора СФД не способно обеспечить увеличение коэффициента корреляции из-за накопления в схеме повторителя собственных шумов усилителя. Полученные в работе результаты представляют научно-практический интерес для создания и программно-численного анализа проектных решений в области стробоскопической обработки и радиофотонного преобразования радиоизображений посредством амплитудной электрооптической модуляции лазерного излучения принятым радиочастотным СКИ-сигналом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Источники финансирования отсутствуют.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банков С.Е., Курушин А.А. *Расчет излучаемых структур с помощью FEKO*. М.: ЗАО “НПП “РОДНИК”, 2008. 246 с.
- Бойков К.А., Костин М.С., Куликов Г.В. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутри-схемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств. *Российский технологический журнал*. 2021. Т. 9. № 4. С. 20–27.
<https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-4-20-27>
- Будагян И.Ф., Костин М.С., Шильцин А.В. Строб-фрейм-дискретизация радиоимпульсов субнаносекундного диапазона. *Радиотехника и электроника*. 2017. Т. 62. № 5. С. 486–492.
<https://doi.org/10.7868/80033849417050047>
- Григорьев А.Д. *Методы вычислительной электродинамики*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 432 с.
- Костин М.С., Бойков К.А., Стариковский А.И. Циклоподобная регенерация субнаносекундных радиоимпульсов. *Вестник РАЕН*. 2018. Т. 18. № 3. С. 107–113.
- Костин М.С., Бойков К.А. *Радиоволновые технологии субнаносекундного разрешения: монография*. М.: РТУ МИРЭА, 2021.
- Костин М.С., Бойков К.А., Котов А.Ф. Высокоточные методы циклоподобной атактовой оцифровки субнаносекундных сигналов. *Радиотехника и электроника*. 2019. Т. 64. № 2. С. 191–194.
<https://doi.org/10.1134/S0033849419020104>
- Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. Ч. 1. Основные понятия, модели и методы описания. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008. Т. 13. № 2. С. 166–194.
- Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. *Обработка сверхширокополосных сигналов и помех*. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
- Тимановский А.Л., Пирогов Ю.А. *Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. Монография*. М.: Радиотехника, 2017. 160 с.
- Шильцин А.В., Марков Д.В., Латышев К.В., Петленко Д.Б. Моделирование электрооптических повторителей субнаносекундных импульсов с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием. *Межотраслевой научно-технический журнал “Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России”*. 2020. № 2 (146). С. 51–57.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-50-59>

Simulation of signal repeater of radio pulses for radio-sensor authentication systems

A. V. Shiltsin^{a,*} and M. S. Kostin^a

^a MIREA – Russian Technological University 119454 Moscow, prosp. Vernadsky, 78, Russia

*E-mail: adaptox@gmail.com

The construction and analysis of parametric variations of the schemes of the program-numerical model of the signal repeater of ultrashort radio pulses was presented in this article, and the software-numerical emulation and algorithmization of the stroboscopic method for recording and processing radio images generated by

a digital twin — an electrodynamic model of a probed object, represented by an aircraft-type drone. An electro-optical method is proposed for an alternative solution to the radio engineering problem of stroboscopic registration and recovery of ultrashort radio pulses of nanosecond duration with subnanosecond resolution, which constitute the radio image signature of irradiated objects for systems of radiosensor signal-tomographic authentication. In the Simulink environment, software models of infraoptic repeaters have been developed that make it possible to numerically analyze and investigate the effectiveness of the method of optical regeneration of radio pulses using a fractional multiplexing scheme with delayed feedback. A radio response from a digital twin of a target irradiated with a Gaussian ultrashort radio pulse was simulated in the Altair Feko electrodynamic simulation software environment. It is shown that an electro-optical repeater with sixteen delay lines in 20 iterations is capable of recovering a radio response from a target with a correlation coefficient of more than 0.9 between the reference and reconstructed pulses with a signal-to-noise ratio of at least 9 dB.

Key words: electro-optical repeater, USP-signal, recuperation, radio sensor system, radio image, impulse response

REFERENCES

- Bankov S.E., Kurushin A.A. Raschet izluchaemykh struktur s pomoshch'yu FEKO [Calculation of emitted structures with FEKO] CJSC NPP "RODNIK", 2008. 246 p.
- Boykov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V. Radiosensory diagnostics of signal integrity in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal] 2021. part. 9. № 4. P. 20–27.
<https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-4-20-27>
- Budagyan I.F., Kostin M.S., Shiltsin A.V. Strobe-frame sampling of subnanosecond radio pulses. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of communications technology and electronics]. 2017. V. 62. № 5. P. 486–492.
<https://doi.org/10.7868/80033849417050047>
- Grigoryev A.D. Metody vychislitel'noy elektrodinamiki [Computational electrodynamics methods]. M.: FIZMATLIT. 2012. 432 p.
- Kostin M.S., Boykov K.A., Starikovkiy A.I. Cyclo-like regeneration of subnanosecond radio pulses. *Vestnik RAEN* [RANS Bulletin]. 2018. V. 18. № 3. P. 107–113.
- Kostin M.S., Boykov K.A., Radiovolnovyye tekhnologii subnanosekundnogo razresheniya: monografiya [Radio wave technologies of subnanosecond resolution: monograph]. M.: RTU MIREA, 2021.
- Kostin M.S., Boykov K.A., Kotov A.F. High-precision methods for cyclo-like atact digitization of subnanosecond signals. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics]. 2019. V. 64. № 2. P. 191–194.
<https://doi.org/10.1134/S0033849419020104>
- Lazorenko O.V., Chernogor L.F. Ultra-wideband signals and physical processes. Ch1. Basic concepts, models and methods of description. *Radiofizika i astronomiya* [Radiophysics and radio astronomy]. 2008. V. 13. № 2. P. 166–194.
- Radzievsky V.G., Trifonov P.A. Processing of ultra-wideband signals and interference. M.: Radiotekhnika, 2009. 288 p.
- Timanovsky A.L., Pirogov Yu.A. Superresolution in passive radio imaging systems. *Monograph*. M.: Radiotekhnika, 2017. 160 p.
- Shiltsin A.V., Marcov D.V., Latyshev K.V., Petlenko D.B. Modeling of electro-optical repeaters of subnanosecond pulses with reversed retained communication and fractional multiplexing. *Mejotraslovoy nauchno-tekhnicheskii jurnal "Obotonnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii"* (Interdisciplinary scientific and technical journal "Defense complex – to the scientific and technological progress of Russia"). 2020. № 2 (146). P. 51–57.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-50-59>

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА “СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ”

DOI: 10.31857/S023500922101011X

Все рукописи подаются в Редакцию журнала через редакционно-издательскую систему (РИС). Для подачи рукописи автор-корреспондент (тот, кто подает рукопись) должен зарегистрироваться в РИС. Данные, которые требуется указать автору при регистрации, необходимы для автоматического заполнения договоров с издателями. Регистрация пользователей в системе производится на сайте <https://publish.sciencejournals.ru/login>. После регистрации возможна подача рукописи через личный кабинет: загрузка всех необходимых файлов (текст, рисунки, при необходимости – сопроводительные материалы), включая договор о передаче авторского права. В дальнейшем все этапы прохождения рукописи, в том числе рецензии и решение Редколлегии, могут быть отслежены через личный кабинет автора. При подаче материалов обязательно дублировать статьи по почте editor@sensorysystems.ru.

Журнал “Сенсорные системы” публикует оригинальные статьи, обзоры, краткие сообщения. Назначение журнала – освещать физические, физиологические, морфологические и информационные аспекты структуры и функции биологических и технических сенсорных систем, принципы представления и переработки информации из окружающего мира и реконструкции его содержания, алгоритмы работы систем автоматического анализа сенсорной информации для управления аппаратами, заменяющими человека в разных сферах деятельности. Журнал принимает только те статьи, которые соответствуют тематике журнала.

Журнал придерживается правил международного Комитета по этике публикаций (Committee on Publication Ethics – COPE, подробнее можно ознакомиться на сайте: <https://sensorysystems.ru/ru/ethics.html>).

К публикации принимаются завершённые экспериментальные и теоретические работы, ранее нигде не публиковавшиеся и не представленные для публикации в другом издании. Поступающие рукописи проверяются на наличие плагиата.

Статьи, опубликованные в журнале “Сенсорные системы”, выборочно публикуются в переводе на английский язык в журнале “Neuroscience and Behavioral Physiology”. Отбор статей для перевода производится редакционными коллегиями и главными редакторами обоих журналов по согласованию с авторами.

Шаблон рукописи в формате doc можно скачать по ссылке: http://sensorysystems.ru/ru/article_submission.html.

К рукописи обязательно должны быть приложены:

- подписанный лицензионный договор (бланк договора можно скачать по адресу: http://sensorysystems.ru/ru/article_submission.html/);
- номер телефона и адрес электронной почты контактного лица (на отдельном листе или в тексте письма).

Прохождение рукописей

Все рукописи, поступившие в редакцию, **рецензируются** не менее чем двумя рецензентами “слепым” рецензированием. В роли рецензентов могут выступать внешние эксперты и члены редколлегии. Решение о публикации принимается Редколлегией журнала на основе полученных рецензий. Автор может рекомендовать двух-трех рецензентов для своей работы, но право выбора рецензентов остается за Редколлегией. Редколлегия может поставить условием публикации доработку рукописи в соответствии с рекомендациями рецензентов. Редколлегия оставляет за собой право отклонить рукопись, если она не соответствует профилю журнала, неудовлетворительна по научному содержанию или по техническому исполнению. Рецензии направляются авторам вместе с мотивированным заключением (“принять”, “доработать”, “отклонить”). В случае заключения “доработать”, авторы должны представить доработанный вариант рукописи в течение трех месяцев. При предоставлении измененной рукописи в более поздний срок, она рассматривается как новая. Рецензии и заключения Редколлегии хранятся в редакции и Издательстве в течение 5 лет.

Авторские экземпляры

Авторам высылается PDF-файл опубликованной статьи.

Технические требования к рукописи

Рукописи представляются в электронном виде на русском или английском языках. Электронный файл должен быть в формате DOC. Один

электронный файл должен содержать полный набор информации, т.е. основной текст, подписанные подписи, таблицы и рисунки.

Рукопись должна быть набрана шрифтом Times New Roman 12 pt, отформатирована через 1.5 интервала, на листах А4 с полями 3-5 см с левой стороны, 1 см с правой стороны, не менее 3 см сверху и снизу. Каждый абзац начинается с красной строки, межабзацный отступ должен быть равен межстрочному интервалу. Все страницы рукописи нумеруются по порядку.

При первом введении аббревиатур дается их полная расшифровка. Другие сокращения слов, кроме единиц измерения и сокращения “т.е.”, не допускаются.

При наборе правильно используйте прописные и строчные буквы, буквы русского и латинского алфавитов и другие символы сходных начертаний. Помните, что в компьютерных текстах все эти символы имеют разные коды.

Рисунки располагаются в конце рукописи, а не в тексте. Каждый рисунок выполняется на отдельной странице с указанием номера рисунка. Разрешение рисунков должно быть не менее 300 dpi. Рекомендуются, чтобы ширина рисунка на странице составляла 8-8.5 см (на одну колонку) или 17-17.5 см (на две колонки). При этом с рукописью обязательно должны быть сданы исходные файлы иллюстраций.

Векторные иллюстрации должны быть предоставлены в стандартном формате файлов графического редактора, в котором они были подготовлены, также принимается формат EPS. Остальные иллюстрации принимаются в любых стандартных графических форматах, предпочтительно – TIFF.

Если рисунок содержит несколько фрагментов, они обозначаются по порядку курсивными строчными буквами русского алфавита: *а, б, в* и т.д.

Цветные рисунки допускаются только по предварительному согласованию с редакцией.

Если авторы используют в своей рукописи иллюстрации или таблицы из других публикаций (в том числе своих собственных), то им необходимо запросить у Издателей этих публикаций разрешение на перепечатку или использование материалов. Подробнее: <https://www.pleiades.online/ru/authors/permission/>

Подписи к рисункам даются в конце текста статьи на отдельной странице (все на одной) и должны быть лаконичными и не дублировать основной текст рукописи, однако все условные обозначения и символы должны быть расшифрованы, значения координатных осей указаны.

Таблицы набираются при помощи редактора таблиц. Каждая таблица выполняется на отдельной странице после текста рукописи.

Дополнительные материалы

Для более полного описания исследования, к статье могут прилагаться дополнительные материалы (аудио- и видеофайлы, презентации, дополнительные таблицы и рисунки и пр.) при условии, если автор является правообладателем прикладываемых материалов, и автором ранее не были переданы авторские права на их использование иным (кроме издателя) лицам, либо автор имеет письменное разрешение правообладателя на их использование в целях опубликования и распространения в журнале. Дополнительные материалы публикуются только в электронной версии на сайте <https://elibrary.ru>.

Структура и оформление рукописи

На первой странице рукописи приводятся:

– УДК (индекс Универсальной десятичной классификации).

– Заглавие. Заголовок статьи должен быть максимально конкретным, желательно не более 1.5-2 строк (лучше в пределах одной строки).

– Инициалы и фамилия (фамилии) автора (авторов).

– Полное название и адрес организации, где выполнена работа. Если авторы публикации – из разных учреждений, то аффилиация каждого отмечается надстрочной цифрой (например, И.И. Иванов¹). В английском резюме аффилиации отмечаются латинскими буквами (I.I. Ivanov^a). Контактный адрес e-mail одного из авторов. Контактный автор в тексте отмечается звездочкой (например, И.И. Иванов^{1,*}). В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov[#]).

– Слова “Поступила в редакцию...”, “После доработки...”, “Принята к публикации...” (даты будут вписаны редакцией).

– Аннотация на русском языке объемом до 3/4 страницы. Аннотация должна давать представление о предмете исследования, использованных методах и основных результатах.

– Ключевые слова.

– DOI: (DOI будет вписан редакцией).

Пример оформления шапки русскоязычной части статьи:

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ

© 2018 г. И. И. Иванов^{1,*}, П. П. Петров¹, С. С. Сидоров²

¹ Место работы первого автора, 127000 Москва, Один Переулок, д. 19, Россия

² Место работы второго автора, 127000 Москва, Другой Переулок, д. 19, Россия

*E-mail: author1@mail.ru

Поступила в редакцию ...

После доработки ...

Принята к публикации ...

Последующие разделы начинаются со второй страницы. Стандартная структура рукописи, описывающая экспериментальное исследование, включает следующие разделы.

— **Введение** должно содержать изложение проблемы, уровень ее изученности на данный момент и вытекающие отсюда задачи исследования.

— **Описание методики** должно показать соответствие технологии и методов задачам работы и при необходимости обеспечить воспроизводимость результатов другими исследователями. Необходимо указать вид и число наблюдений, дозы веществ, параметры стимуляции, особенности наркоза и пр. При выполнении экспериментов на людях или животных, обязательно описание тех особенностей методики, которые обеспечивают соблюдение норм безвредности экспериментов для людей и гуманного обращения с животными.

— **Результаты исследования** должны содержать описание всех оригинальных данных, представляющих научную ценность и используемых в дальнейшем для обсуждения.

— **Обсуждение** должно касаться рассмотрения и оценки важнейших результатов. Привлекайте для обсуждения только свои оригинальные данные, изложенные в разделе “Результаты”, и данные цитируемых литературных источников. Не включайте в раздел информацию, если не можете точно указать ее источник. При необходимости может привлекаться любая опубликованная информация, но желательно избегать ссылок на нерцензируемые издания, не гарантирующие достоверность сведений (например, краткие тезисы конференций, научно-популярные публикации).

— **Заключение или Выводы.**

— **Финансирование.** Следует указать, каким фондом и грантом поддержано данное исследование и каждая часть работы в отдельности, если источники финансирования разные.

— **Благодарности.** Раздел не является обязательным, заполняется по желанию авторов.

— **Конфликт интересов.** Раздел является обязательным. В случае отсутствия конфликта интересов, авторы также указывают “Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить”.

— **Соблюдение этических норм.** Раздел является обязательным. Если исследования проводились на животных, то в данном разделе указывается: “Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием животных, соответствовали этическим стандартам учреждения, в котором проводились исследования, и утвержденным правовым актам РФ и международных организаций”. Если исследования проводились с участием людей, то в разделе “Соблюдение этических норм” указывается: “Все процедуры, выполненные в исследованиях с

участием людей, соответствуют этическим стандартам национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 года и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие”. Если в статьях не содержится описания исследований с участием людей или использованием животных и выполненных кем-либо из авторов, в разделе “Соблюдение этических норм” указывается: “Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов”.

— **Участие авторов.** В разделе указывается вклад в работу каждого из авторов.

— **Список литературы.**

— **Резюме** на английском языке.

— **REFERENCES.**

Резюме на английском языке включает:

— Заглавие.

— Инициалы и фамилии авторов. Если в статье более одного автора, перед фамилией последнего пишется “and” (I.I. Ivanov, P.P. Petrov, and S.S. Sidorov).

— Название и адрес учреждения. Адрес учреждения обязательно содержит название страны. Если авторы из разных учреждений, то в английском резюме аффилиации отмечаются латинскими буквами (I.I. Ivanov^a).

— Контактный адрес e-mail одного из авторов. В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov[#]).

— Аннотацию (abstract). Содержание аннотации на английском языке должно быть идентичным русскоязычной аннотации.

— Ключевые слова (key words).

Пример оформления шапки английского резюме:

Paper title

I. I. Ivanov^{a, #}, P. P. Petrov^a, and S. S. Sidorov^b

^a First Institution, 127000 Moscow, One lane, 19, Russia

^b Second Institution, 127000 Moscow, Another lane, 19, Russia

[#]E-mail: author1@mail.ru

Допускается отклонение от стандартной схемы рукописи, например, объединение разделов “Результаты исследования” и “Обсуждение”. Для обзорных статей более адекватна рубрикация (если необходима), соответствующая тематическим разделам.

Литературные ссылки в тексте даются в круглых скобках по фамилии (фамилиям) авторов и, через запятую, году публикации. Если авторов

двое, их фамилии упоминаются через запятую, без союза. Например: “Предшествующими исследованиями показано (Иванов, Петров, 2000), что...”. В случае трех и более авторов указывается только первая фамилия с добавлением “и др.” (для русскоязычных публикаций) или “et al.” (для англоязычных публикаций). При цитировании нескольких источников, они указываются через точку с запятой: (Рожкова, 2015; Николаев, 2001). Для ссылки на разные работы коллективов с одинаковым первым автором и одного года опубликования добавляются буквы а, б, в. (Рожкова, 2015а; 2015б). В списке литературы буквы а, б, в указываются сразу после года, без пробела. В списке “REFERENCES” указывать буквы не нужно.

Список литературы и список “REFERENCES” включают все те и только те публикации, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на неопубликованные работы (с указанием “в печати”, “личное сообщение” и т.п.) не допускаются.

Обратите внимание, что с 2018 г. список литературы в статьях приводится дважды: один раз — в формате, удобном для читателей, второй — в формате, удобном для поисковых систем. Под заголовком “Список литературы” русскоязычные публикации указываются в кириллице, англоязычные (и любые другие в латинской транскрипции) — в латинице. Под заголовком “REFERENCES” русскоязычные источники указываются в латинице (правила оформления далее), англоязычные (и любые другие в латинской транскрипции) источники полностью дублируются. Порядок публикаций в этих списках одинаков: русскоязычные источники идут перед источниками в латинице и выстраиваются в порядке русского алфавита (даже при транслитерации).

Транслитерация русскоязычных названий для формирования списка “REFERENCES” должна выполняться в соответствии с форматом BSI (рекомендуется использовать бесплатный сервис <http://ru.translit.net/?account=bsi/>). Если в русскоязычной публикации имелось англоязычное резюме, или англоязычная версия названия и фамилий авторов, фамилии авторов следует давать в том же написании, как в оригинальной публикации. Если в русскоязычной публикации отсутствовало англоязычное резюме или англоязычная версия названия и фамилий авторов, то для написания фамилий авторов рекомендуется использовать транслитерацию, которую использует сам автор (например, в его англоязычных публикациях). Если авторское написание неизвестно, тогда используется формат транслитерации BSI.

Пожалуйста, аккуратно указывайте названия журналов. Названия журналов должны приводиться либо полностью, либо с сокращениями,

согласно “list of serial titles word abbreviations”. Предпочтительно использовать сокращения.

При наличии у публикации DOI, его указание обязательно.

Если статья написана на русском языке, и в списке цитируемой литературы отсутствуют русскоязычные источники, список дается однократно, при этом предваряется заголовками “Список литературы” и затем, с новой строки, “REFERENCES”. Слово “REFERENCES” является ключевым для поисковых систем международных баз данных. Заголовок “Список литературы” необходим для всех русскоязычных статей.

Оформление раздела “Список литературы”

Список начинается на отдельной странице, составляется в алфавитном порядке фамилий авторов (сначала публикации на русском языке, затем — на иностранных языках), без нумерации.

Обратите внимание, что теперь фамилии и инициалы пишутся прямым шрифтом, название книги/журнала — курсивом, знак “//” в списке литературы не используется.

Список составляется по следующему образцу.

Книги

Фамилия И.О. *Заголовок книги*. Город (Москва и Санкт-Петербург — сокращенно: М., СПб.). Изд-во, 1995. 351 с.

Статьи и главы в книгах, неперiodических изданиях, сборниках трудов

Фамилия И.О. *Заголовок статьи. Название книги*. Под ред. Фамилия И.О. Город. Изд-во, 1995. Ч. I. С. 22–35.

Статьи в журналах

Фамилия И.О. *Заголовок статьи. Название журнала*. 1995. Т. I. № 1. С. 22–27. DOI: xxxxxxx.

Диссертации и авторефераты диссертаций

Мы рекомендуем вместо ссылок на диссертации и авторефераты давать ссылки на статьи или монографии по теме диссертации: такие публикации легче найти, если читатель хочет ознакомиться с материалом, и такие цитирования лучше учитываются поисковыми системами.

Фамилия И.О. *Название диссертации*. Дисс. канд. (докт.) биол. наук. Город. 2000. 351 с.

Интернет-ресурсы

Фамилия И.О. *Название статьи*. URL: http://example_url.html (дата обращения: 23.06.2013).

ГОСТы

ГОСТ 8.586.5-2005. *Название ГОСТа*. М. Центр стандартизации, 2007. 10 с.

Патенты

Фамилия И.О. *Название патента*. Патент РФ. № 2486597. 2013.

Оформление раздела “REFERENCES”

Если в цитируемой русскоязычной публикации имелись англоязычные версии заголовка и фамилий авторов, то в разделе “References” они должны быть даны в точном соответствии с тем, как представлены в публикации. Если в русскоязычной публикации эти данные отсутствовали, название, фамилии авторов и библиографические данные должны быть транслитерированы в соответствии с форматом BSI. После транслитерации в квадратных скобках должен быть указан перевод (без выделения курсивом). В самом конце библиографического описания в круглых скобках помещают указание на исходный язык публикации, например, “(in Russian)”. Издательство приводится транслитерацией, если не имеет собственного названия на английском языке.

Книги

Polyak S.L. *The Retina*. Chicago, The University of Chicago Press. 1941. 607 p.

Byzov A.L. *Elektrofiziologicheskie issledovaniya setchatki* [Electrophysiological studies of the retina]. Moscow. Nauka Publ., 1966. 196 p. (in Russian).

Статьи и главы в книгах, неперiodических изданиях, сборниках трудов

Rozhkova G.I. Binokulyarnoe zrenie [Binocular vision]. *Rukovodstvo po fiziologii. Fiziologiya zreniya* [Handbook on physiology. Vision physiology] Moscow. Nauka, 1992. P. 586–664 (in Russian).

Статьи в журналах

Gladkov A.P., Kuznetsova E.G., Gladilin S.A., Gracheva M.A. Adaptivnaya stabilizatsiya yarkosti izobrazheniya v tekhnicheskoi sisteme raspoznavaniya krupnykh dvizhushchikhsya ob"ektov [Adaptive image brightness stabilization for the industrial system of large moving object recognition]. *Sensornye sistemy*

[Sensory systems]. 2017. V. 31 (3). P. 247–260. DOI: xxxxxxxx (in Russian).

Диссертации и авторефераты диссертаций

Grigor'ev Iu.A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow. 1996. 243 p. (in Russian).

Интернет-ресурсы

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. URL: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmatsevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html (accessed 23.06.2013) (in Russian).

ГОСТы

GOST 8.586.5–2005. *Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostei i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv* [State Standard 8.586.5 – 2005. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

Патенты

Nikolaev D.P., Postnikov V.V., Khanipov T.M., Usilin S.A., Grigoryev A.S. *Sposob avtomaticheskoi klassifikatsii transportnykh sredstv* [Method of automatic classification of vehicles]. Patent RF. No. 2280590. 2006.

Рукописи следует направлять по электронной почте на адрес editor@sensorysystems.ru и дублировать на адрес sensys-li@mail.ru.

С правилами для авторов можно также ознакомиться по адресу: http://sensorysystems.ru/ru/article_submission.html