

---

---

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 35, номер 1, 2021

---

---

## Зрение

- Оммохромы сложного глаза насекомых: антигликирующее действие  
*А. Е. Донцов, М. А. Яковлева, М. А. Островский* 3
- Нейроны *Tectum opticum* рыб, электрическая активность  
и подбор адекватной стимуляции  
*А. А. Зайчикова, И. Дамянович, П. В. Максимов,  
А. Т. Алипер, Е. М. Максимова* 11
- Даунрегуляция ультрафиолет-чувствительного зрительного  
пигмента таракана уменьшает эффект маскинга  
при коротковолновом освещении  
*Е. С. Новикова, И. Ю. Северина, И. Л. Исавнина, М. И. Жуковская* 22
- Частотно-временные особенности движения глаз  
при использовании видеоокулографического интерфейса  
в задачах управления эргатическими системами  
*Я. А. Туровский, А. В. Алексеев, И. Е. Лесных, Е. В. Мартыненко* 30
- 

## Вибрационная чувствительность

- Перспективы использования данных о вибрационной коммуникации  
для разработки безопасных методов контроля численности насекомых  
*Л. С. Шестаков, А. Эль Хашаи* 38
- 

## Техническое зрение

- Метод ансамблирования алгоритмов кластеризации для решения  
задачи совместной кластеризации  
*И. И. Байков, Е. А. Семенова, А. И. Курмуков* 43
- Улучшение нейросетевого детектора отрезков путем добавления  
инженерных признаков  
*Л. А. Ерлыгин, Л. М. Тепляков* 50
- Распознавание проективно преобразованных плоских фигур.  
XV. Методы поиска осей и центров овалов с симметриями,  
использующие сет дуальных пар либо триады чевиан  
*П. П. Николаев* 55
- Аппаратная независимость и точность нейросетевого шумоподавления  
на изображениях как функция объема обучающих данных  
*Н. И. Попов, А. С. Григорьев* 79
- 
- Правила для авторов журнала “Сенсорные системы” 84
- 
-

# Contents

---

---

Vol. 35, No. 1, 2021

---

---

## Vision

- Ommochromes of the compound eye of insects: antiglycation activity  
*A. E. Dontsov, M. A. Yakovleva, M. A. Ostrovsky* 3
- Visual neurons of fish tectum opticum, their extracellular spike activity  
and search for their adequate stimulation  
*A. A. Zaichikova, I. Damjanovic, P. V. Maximov,  
A. T. Aliper, E. M. Maximova* 11
- Downregulation of cockroach uv-sensitive visual pigment decreases  
masking effect of short wavelength illumination  
*E. S. Novikova, I. Yu. Severina, I. L. Isavnina, M. I. Zhukovskaya* 22
- Frequency-time features of eye movement when using the video-oculographic  
interface in ergatic system control problems  
*Y. A. Turovskii, A. V. Alekseev, I. E. Lesnykh, E. V. Martynenko* 30
- 

## Vibration sensitivity

- The use of vibrational signals of insects to develop safe methods  
for pest control  
*L. S. Shestakov, A. Elhashash* 38
- 

## Technical vision

- General ensemble method for multi-view clustering  
*I. I. Baikov, E. A. Semerova, A. I. Kurmukov* 43
- Improvement of a line segment detector based on a neural network  
by adding engineering features  
*L. A. Erlygin, L. M. Teplyakov* 50
- Recognition of projectively transformed planar figures.  
XV. Methods for searching for axes and centers of ovals with symmetries,  
using a set of dual pairs or cevian triads  
*P. P. Nikolaev* 55
- Hardware independence and accuracy of neural network denoising  
of images depending on training set size  
*N. I. Popov, A. S. Grigoriev* 79
- Guidelines for authors 84
- 
-

УДК 565.7; 577.117; 577.112.4; 612.84

## ОММОХРОМЫ СЛОЖНОГО ГЛАЗА НАСЕКОМЫХ: АНТИГЛИКИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ

© 2021 г. А. Е. Донцов<sup>1,\*</sup>, М. А. Яковлева<sup>1</sup>, М. А. Островский<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,  
119334 Москва, ул. Косыгина, д. 4, Россия

\*E-mail: adontsovnick@yahoo.com

Поступила в редакцию 14.10.2020 г.

После доработки 20.10.2020 г.

Принята к публикации 02.11.2020 г.

Оммохромы – экранирующие и антиоксидантные органеллы сложного глаза беспозвоночных животных выполняют функцию светофильтрации, поглощения и антиоксидантной защиты. В настоящей работе впервые обнаружено, что оммохромы *in vitro* проявляют антигликирующую активность. Оммохромы были получены из глаз насекомых трех различных семейств: *Stratiomyidae*, *Sphingidae* и *Acrididae*. Показано, что все изученные оммохромы ингибировали реакцию образования флуоресцирующих продуктов модификации сывороточного альбумина в присутствии высоких концентраций фруктозы (фруктозилирование). Оммохромы из глаз мухи “черная львинка” (*Hermetia illucens*) были наиболее эффективными ингибиторами процесса фруктозилирования. Оммохромы, окисленные пероксидом водорода, не проявляли ингибирующего действия в отношении процесса гликирования. Полученные результаты представляют интерес как для понимания биологической роли оммохромов у беспозвоночных животных, в частности, для выяснения их влияния на окислительную модификацию белков ретикулярных и пигментных клеток омматидия, так и для создания на их основе фармакологических препаратов для лечения и предотвращения патологий, связанных с развитием метаболического синдрома.

**Ключевые слова:** оммохромы, насекомые, гликирование, фруктозилирование

**DOI:** 10.31857/S0235009221010030

### ВВЕДЕНИЕ

Природные органические пигменты оммохромов широко распространены среди беспозвоночных животных и особенно характерны для различных членистоногих (тип *Arthropoda*) (Butenandt, Schafer, 1962). Оммохромы синтезируются из триптофана через промежуточное образование кинуренина (Linzen, 1974). Оммохромы, как правило, подразделяют на три различных класса – омматины, оммины и оммидины. Структура и химические свойства омматинов довольно хорошо изучены, в то время как пока немного известно относительно двух других групп оммохромов. Экранирующие пигменты беспозвоночных животных, как и меланины позвоночных, локализируются в специфических оммохромных гранулах или оммохромосомах (Figon, Casas, 2019). Гранулы, содержащие экранирующий пигмент, присутствуют почти во всем клеткам, составляющим омматидий. В глазах беспозвоночных оммохромы локализируются как в пигментных, так и в рецепторных ретикулярных клетках. Количество оммохромов, содержащихся в глазах членистоногих, довольно высокое. Так, например, сухой вес оммохромов в

глазах реликтовой креветки (*Mysis relicta*) может достигать 20% от общего веса глаза, а концентрация оммохромов в глазу мухи “черная львинка” (*Hermetia illucens*) достигает 90 мг/мл (Dontsov et al., 1999; Донцов и др., 2020).

Основные функции оммохромов, как экранирующих пигментов глаза, это: защита фоторецепторных элементов ретикулярных клеток в ходе световой адаптации; экранирование отдельных омматидиев друг от друга и повышение, таким образом, разрешающей способности глаза; регуляция спектральной чувствительности фоторецепторов, а также раскраска кожных покровов (Langer, 1975; Грибакин, Чеснокова, 1984; Островский и др., 2018). Наряду с оптической, оммохромы также могут участвовать в регуляции клеточного гомеостаза путем детоксикации свободного триптофана и ослаблении оксидативного стресса (Figon, Casas, 2019). Регуляция оксидативного стресса оммохромами связана с их способностью быть как донорами, так и акцепторами электронов и функционировать как эффективные антиоксидантные молекулы (Ostrovsky et al., 1987; Insausti et al., 2013; Romero, Martinez, 2015;

Farmer et al., 2017; Dontsov, Ostrovsky, 2019; Островский, Донцов, 2019). Высокая антиоксидантная активность оммохромов, выделенных из глаз различных насекомых, была показана нами ранее (Ushakova et al., 2019; Донцов и др., 2020).

Хорошо известно, что антиоксиданты могут подавлять развитие реакции Майяра (Edeas et al., 2010). Реакция Майяра или не-энзиматическое гликирование — это сложный реакционный процесс между альдегидными (или кетонными) группами редуцирующих сахаров и аминоклассами белков, в результате которого образуются так называемые поздние продукты гликирования (ППГ). Считается, что ППГ, аккумулирующиеся в клетках в результате гипергликемии, один из основных факторов риска развития таких возрастных заболеваний, как разные формы диабета, в том числе диабетические атеросклероз и катаракта (Lapolla et al., 2005), возрастная макулярная дегенерация сетчатки и сердечно-сосудистые заболевания (Chiu, Taylor, 2011; Uchiki et al., 2012). Так, известно, что избыток фруктозы может приводить к усилению биохимических изменений, способствующих развитию метаболического синдрома и диабета 2-го типа (Gugliucci, 2017). В связи с этим очень важен поиск новых антиоксидантов, способных ингибировать развитие реакции Майяра при гипергликемии. Ранее мы показали, что как природные, так и синтетические антиоксиданты способны подавлять развитие не-энзиматической модификации белков, вызванной избыточными концентрациями фруктозы (Донцов и др., 2017; Донцов и др., 2019). Цель настоящей работы — получение оммохромов из различных насекомых и исследование их антигликирующей активности.

## МЕТОДИКА

В работе использовали реактивы фирм “Sigma-Aldrich” (США), “Fluka” (Швейцария) и “Компонент-реактив” (Россия).

**Выделение оммохромов.** Оммохромы были выделены из трех видов насекомых: мухи “черная львинка” (*Hermetia illucens*, семейство *Stratiomyidae*), бабочки “бражник табачный” (*Manduca sexta*, семейство *Sphingidae*) и саранчи пустынной (*Schistocerca gregaria*, семейство *Acrididae*), чистые культуры которых были получены из Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН и из энтомологического отдела Московского зоопарка. Экстракцию и очистку оммохромов проводили из голов насекомых без их гомогенизации по стандартной методике (Донцов и др., 2020). Оммохромы из полученных экстрактов осаждали 20%-ным раствором аммиака, центрифугировали при 5000×g в течение 15 мин и высушивали в эксикаторе над слоем безводного хлорида кальция. Для исследования использовали

либо растворы оммохромов в метаноле, содержащем 0.5%-ный хлористый водород (MeOH-HCl), либо тонко дисперсные взвеси в 0.1 М К-фосфатном буфере, pH 7.4.

**Получение окисленных и восстановленных оммохромов.** Окисленные оммохромы получали путем окисления исходных оммохромов избытком пероксида водорода. Для этого суспензию пигментов (2–3 мг/мл) в 0.1 М К-фосфатном буфере, pH 7.4, или раствор оммохромов в MeOH-HCl (0.5–1.0 мг/мл) инкубировали в присутствии 200 мМ пероксида водорода не менее 1 ч. После чего оммохромы осаждали 20%-ным раствором аммиака и отмывали от избытка пероксида водорода дистиллированной водой. Восстановленные оммохромы получали путем восстановления исходных оммохромов избытком аскорбата натрия (50 мМ) с последующим осаждением и отмывкой оммохромов от избытка восстановителя.

**Анализ экстрактов оммохромов.** Анализ экстрактов оммохромов проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе фирмы “Knauer” (Германия) с колонкой “Диасфер 120 C18” (4 × 250 мм, размер сорбента 5 мкм). Растворитель А — 10% ацетонитрил + 90% воды (+0.5% муравьиной кислоты). Растворитель Б — 100% ацетонитрил (+0.5% муравьиной кислоты). Разделение осуществляли путем линейного градиентного элюирования в системе: от 100%-ного растворителя А до 60%-ного растворителя А и 40%-ного растворителя Б за 60 мин, скорость потока 0.4 мл/мин. Температура колонки 24°C. Продукты хроматографического разделения измеряли при помощи фотометрического детектора “Knauer K-2501”, а также флуориметрического детектора (RF-10A-xl, Shimadzu). Образец оммохромов или стандарта растворяли в 100 мкл смеси метанола с 0.5%-ным HCl. Для работы использовали готовые стандарты: триптофан, кинуренин, 3-гидрокскинуренин, ксантуреновая кислота фирмы “Sigma”. Ксантоматин был синтезирован путем окисления 3-гидрокскинуренина феррицианидом калия, согласно методике, описанной ранее (Butenandt et al., 1954). Спектры оптического поглощения измеряли на спектрофотометре “Shimadzu UV-1601PC” (Япония). Спектры флуоресценции регистрировали на флуориметре “Shimadzu RF-5301PC” (Япония). Для обработки полученных данных использовали программное обеспечение RFPC версия 2.0 (“Shimadzu”).

**Фруктозилирование альбумина.** В качестве субстрата гликирования и карбонилирования использовали бычий сывороточный альбумин (БСА). Для модификации БСА в процессе гликирования в качестве редуцирующего сахара использовали фруктозу. Фруктоза в 8–10 раз более реакционноспособна, чем глюкоза в формирова-

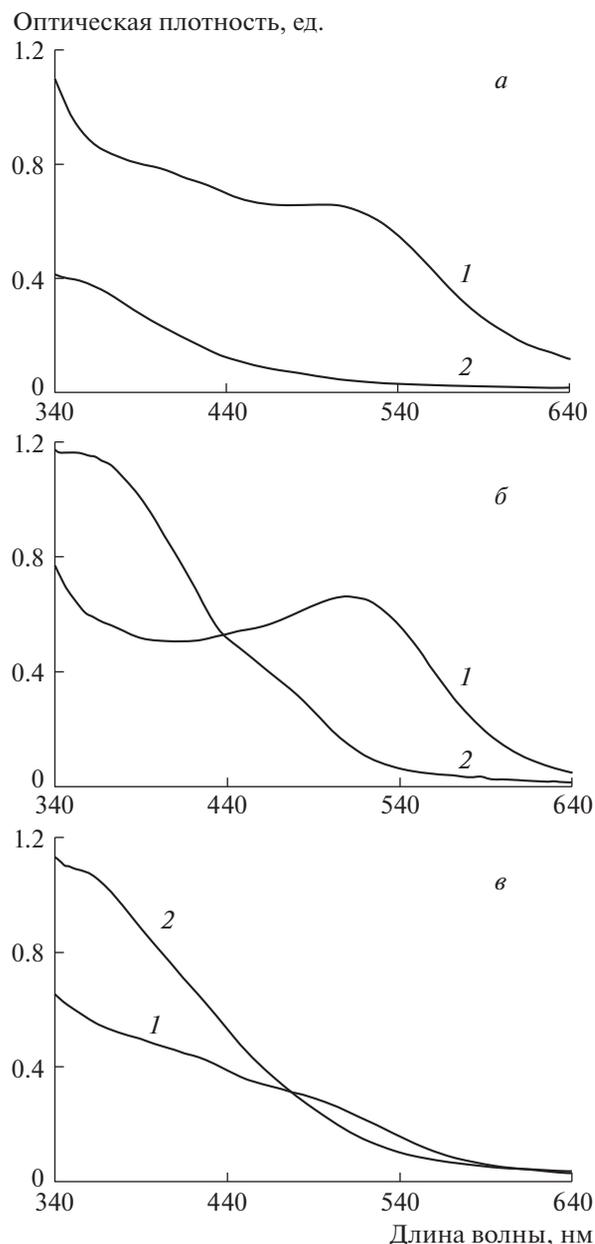
нии продуктов реакции Майяра (Suarez et al., 1991; Dontsov et al., 2016). Поэтому гликирование в присутствии фруктозы (фруктозилирование) значительно быстрее приводит к накоплению флуоресцирующих белковых аддуктов. Среда инкубации содержала: 0.1 М калий-фосфатный буфер, pH 7.4; 50 мМ фруктоза, 2–4 мг/мл БСА, 2–5 мМ азид натрия и оммохромы в разных концентрациях. В качестве контрольных образцов использовали пробы, содержащие оммохромы и не содержащие фруктозу, а также пробы без оммохромов. Образцы инкубировали при 37°C в темноте при постоянном перемешивании в течение 1–5 сут. После инкубации аликвоты образцов диализовали против фосфатного буфера для удаления непрореагировавших низкомолекулярных молекул. Для диализа использовали целлюлозно-эфирную мембрану Float-A-Lyser (“SPECTRUM Labs”, США), пропускающую молекулы с молекулярной массой менее 3.5 кДа. Диализ проводили в течение 25 ч при 6°C. После диализа измеряли интенсивность эмиссионного максимума флуоресценции модифицированного альбумина при длине волны 435 нм (длина волны возбуждающего света 365 нм). Скорость модификации БСА выражали как скорость накопления флуоресцирующих продуктов в альбумине (амплитуда эмиссии в условных единицах) за 1 ч реакции.

Карбонилирование БСА осуществляли при помощи метилглиоксаля. Образцы, содержащие 0.1 М калий-фосфатный буфер (pH 7.4), 2–5 мМ метилглиоксаля, 2–4 мг/мл БСА и разные концентрации оммохромов, инкубировали в темноте при 37°C в течение 2–40 ч при постоянном перемешивании. Контрольные пробы не содержали оммохромы или содержали оммохромы и метилглиоксаль в отсутствие БСА. После инкубации аликвоты образцов обрабатывали также, как и при фруктозилировании БСА и измеряли флуоресценцию при длинах волн возбуждающего света 365 и 460 нм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

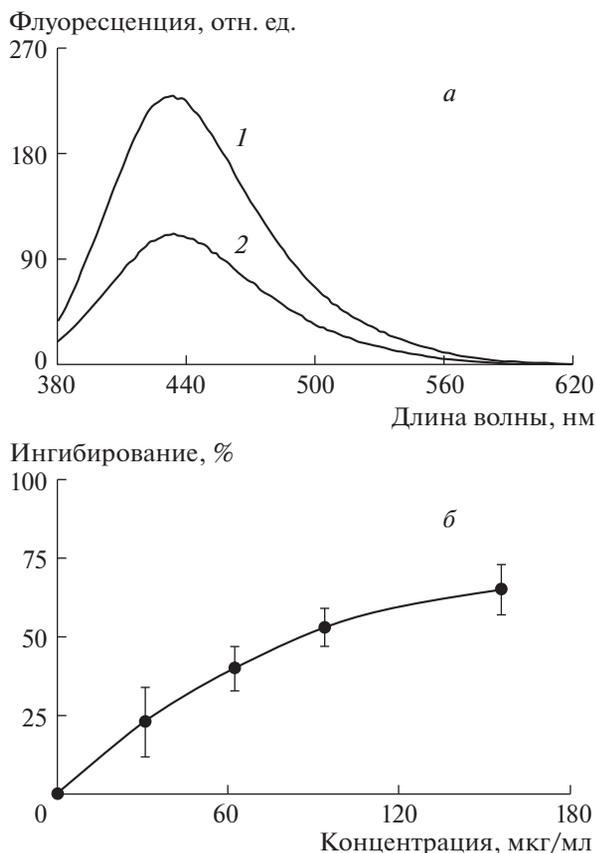
### *Абсорбционные спектры окисленных и восстановленных оммохромов*

Спектры поглощения изолированных оммохромов насекомых в восстановленном (1) и окисленном состоянии (2) для видимой и УФ-области спектра приведены на рис. 1. Наиболее длинноволновый максимум поглощения был характерен для восстановленных оммохромов бабочки “бражник табачный” (508 нм – б). Восстановленные оммохромы мухи “черная львинка” и пустынной саранчи имели максимумы поглощения при 490 и 483 нм (а и в) соответственно. Оммохромы саранчи пустынной не показывали выраженного максимума поглощения в видимой об-



**Рис. 1.** Спектры поглощения оммохромов насекомых в восстановленном (1) и окисленном (2) состоянии. а – оммохромы мухи “черная львинка”; б – оммохромы бабочки “бражник табачный”; в – оммохромы саранчи пустынной. Растворитель – метанол-NCL.

ласти спектра, демонстрируя лишь “плечо” в области 483 нм (в). Максимумы поглощения оммохромов при 430–490 нм в основном присущи для пигментов из класса омматинов, а максимумы поглощения при 520 нм и выше характерны для класса омминов (Butenandt, Schafer, 1962). Абсорбционные спектры оммохромов мухи “черная львинка” и пустынной саранчи более характерны для спектров омматинов; абсорбционный спектр бабочки “бражник табачный” имеет про-

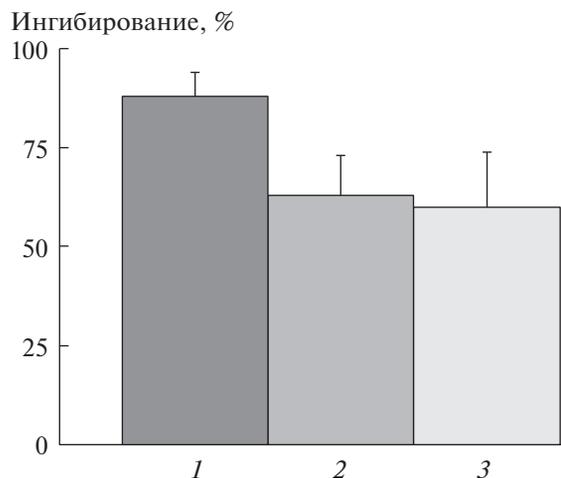


**Рис. 2.** Ингибирующее действие оммохромов мухи “черная львинка” на процесс фруктозилирования БСА. *а* – дифференциальный спектр эмиссии модифицированного фруктозой БСА в контроле (1) и в присутствии 75 мкг/мл оммохромов (2); *б* – зависимость ингибирования реакции модификации БСА фруктозой от концентрации оммохромов. Инкубацию проводили при постоянном перемешивании в течение 72 ч при 37°C. Длина волны возбуждающего света – 365 нм.

межуточный характер, что может быть связано с наличием у них двух типов оммохромов – омматинов и омминов. Окисление оммохромов пероксидом водорода приводит к исчезновению выраженного максимума поглощения в видимой области спектра (кривая 2), что может быть связано с окислением феноксазиновой группы оммохромов и с их частичной окислительной деструкцией.

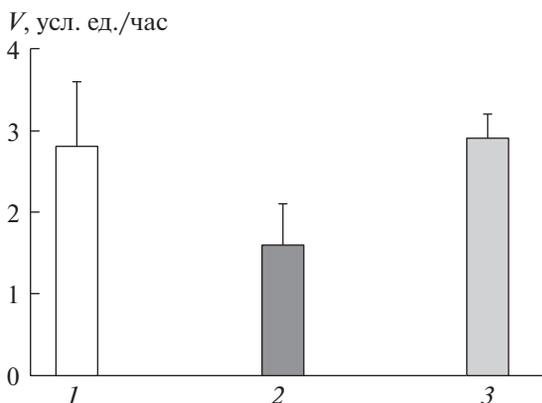
*Действие оммохромов глаза насекомых на накопление флуоресцирующих продуктов реакции БСА с фруктозой и метилглиоксалем*

В экспериментах исследовали влияние оммохромов на процесс гликирования БСА в присутствии высоких концентраций фруктозы (рис. 2, *а*). Поскольку этот процесс представляет собой последовательную серию химических реакций между карбонильной группой фруктозы и амина-



**Рис. 3.** Сравнение степени ингибирования модификации БСА фруктозой оммохромами различных насекомых. 1 – оммохромовы мухи “черная львинка”; 2 – оммохромовы бабочки “бражник табачный”; 3 – оммохромовы пустынной саранчи. Концентрация оммохромов была одинаковой для всех видов и составляла 250 мкг/мл. Процент ингибирования рассчитывали как среднее трех различных определений.

группами БСА с формированием на начальной стадии реакции флуоресцирующих оснований Шиффа, в экспериментах измеряли кинетику нарастания интенсивности флуоресценции при длине волны возбуждения 365 нм. Мы обнаружили, что оммохромовы в диапазоне концентраций от 50–250 мкг/мл значительно угнетали процесс фруктозилирования БСА. Инкубация БСА в присутствии фруктозы в течение 72 ч приводит к значительному увеличению флуоресценции белка (в 8–10 раз) по сравнению с образцами, не содержащими фруктозу (*а*, кривая 1). Это свидетельствует о протекании процесса модификации белка с образованием шиффовых оснований. Оммохромовы мухи “черная львинка” в концентрации 75 мкг/мл более чем в 2 раза снижали интенсивность флуоресценции БСА за тот же период инкубации (*а*, кривая 2), что свидетельствует о довольно хорошей ингибирующей активности оммохромов. Концентрационная зависимость ингибирующего действия оммохромов мухи “черная львинка” на процесс фруктозилирования БСА приведена на *б*. Кривая концентрационной зависимости не линейна и постепенно выходит на насыщение. При концентрациях оммохромов мухи, достигающих 150 мкг/мл, наблюдается примерно 65–70% ингибирования процесса фруктозилирования. Практически полное ингибирование процесса фруктозилирования БСА ( $\geq 90\%$ ) достигается при концентрации оммохромов мухи “черная львинка”, превышающих 250 мкг/мл. Именно эта концентрация оммохромов была использована для сравнения ингибирующего действия пигментов, изолированных из различных насекомых (рис. 3).

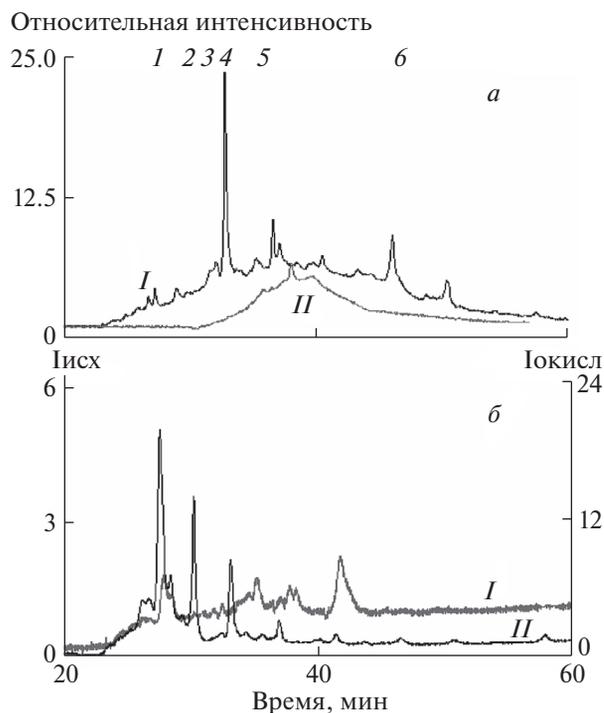


**Рис. 4.** Сравнение ингибирующего действия нативных и окисленных оммохромов. 1 – контроль без оммохромов; 2 – добавлено 100 мкг/мл оммохромов мухи “черная львинка”; 3 – добавлено 100 мкг/мл окисленных оммохромов мухи “черная львинка”. Скорость модификации БСА рассчитывали как среднее трех различных определений.

Присутствие оммохромов всех трех видов насекомых в этой концентрации приводило к значительному ингибированию процесса фруктозилирования БСА, причем оммохромы мухи “черная львинка” проявляли наибольшую ингибирующую активность (1), а оммохромы бабочки “бражник табачный” и пустынной саранчи проявляли примерно равное ингибирующее действие на этот процесс (2 и 3 соответственно). Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что оммохромы проявляют защитное действие на процесс фруктозилирования белка на стадии формирования флуоресцирующих продуктов в реакции Майяра. Механизм антигликирующего действия оммохромов неясен, но, по-видимому, связан со способностью оммохромов, как антиоксидантов, подавлять развитие процесса фруктозилирования. В то же время на модификацию БСА, уже сформировавшимся ППГ, оммохромы, по-видимому, не оказывают существенного влияния. В наших экспериментах модификация БСА метилглиоксалем не ингибировалась оммохромами мухи “черная львинка” (на рисунке не показано). Более того, в отсутствие БСА метилглиоксаль, по-видимому, реагировал с оммохромами, образуя флуоресцирующий продукт с максимумом эмиссии при 450 нм. Природа этого продукта не известна, однако можно предположить, что это вещество не способно проявлять ингибирующее действие на процесс гликирования.

#### Сравнение ингибирующего действия восстановленных и окисленных оммохромов

В отличие от оммохромов, находящихся в восстановленном виде, окисленные оммохромы не



**Рис. 5.** Сравнительная хроматография исходных (I) и окисленных (II) оммохромов из глаз мухи “черная львинка”. а – детектирование по поглощению на длине волны 490 нм; б – детектирование по флуоресценции на длине волны 520 нм при возбуждении длиной волны 460 нм. Оммохромы были окислены пероксидом водорода. Пики: 1 – ксантуреновая кислота, 2 – декарбокислированный ксантомматин, 4 – ксантомматин. Для хроматограмм с детектированием по флуоресценции (б) показаны отдельные оси ординат для образцов I и II.

проявляли способности ингибировать фруктозилирование БСА. На рис. 4 показано сравнительное действие исходных (восстановленных) оммохромов мухи “черная львинка” и оммохромов, окисленных пероксидом водорода, на процесс фруктозилирования БСА. Видно, что в одинаковых концентрациях окисленные оммохромы, в отличие от восстановленных, практически не уменьшали скорости модификации БСА фруктозой (рис. 4, 3). Это связано, вероятно, со значительными изменениями в составе оммохромов. Рисунок 5 демонстрирует сравнительные хроматограммы исходных (I) и окисленных (II) оммохромов мухи “черная львинка”. Хорошо видны значительные изменения в составе оммохромов после их окисления пероксидом водорода. Наблюдается исчезновение некоторых пиков, характерных для исходных оммохромов, например, ксантомматинного пика, и появление новых пиков, не присущих исходным оммохромам (а и б). Вероятно, это связано с частичной окислительной деструкцией оммохромов, потерей ими своих радикальных свойств и антирадикальной

активности (Ushakova et al., 2019; Донцов и др., 2020). В результате окисление оммохромонов приводит к потере ими антиоксидантной и антигликирующей активности. Обнаруженное свойство оммохромонов проявлять антиоксидантное и антигликирующее действие в зависимости от их окислительно-восстановительного состояния может расширить наши представления о регуляции окислительной модификации белков в клетках глаза.

Важно, что оммохромы, которые могут быть легко получены в больших количествах из промышленно разводимых насекомых, могут быть использованы в фармакологической практике для создания новых средств для предотвращения и лечения заболеваний, связанных с накоплением в клетках ППГ в результате гипергликемии. Накопление ППГ имеет место при старении, диабете, артритах, атеросклерозе, хронической почечной недостаточности, нефропатии, нейропатии, болезни Альцгеймера, а также при таких глазных заболеваниях, как катаракта, возрастная макулярная дегенерация, диабетическая ретинопатия. Лекарственные препараты на основе оммохромонов могли бы оказаться при этих патологиях, в том числе при глазных, очень полезными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-04-00411).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грибакин Ф.Г., Чеснокова Е.Г. Использование глазных мутантов для исследования физиологии зрения насекомых. *Успехи соврем. биологии*. 1984. Т. 97. С. 69–82.
- Донцов А.Е., Зак П.П., Островский М.А., Воспельникова Н.Д. Антигликирующее действие мелатонина. *Доклады РАН*. 2017. Т. 475. № 5. С. 1–4.
- Донцов А.Е., Сакина Н.Л., Кузнецов Ю.В., Островский М.А. Антиоксидантные и антигликирующие свойства N-ацетилцистеината-6-гидрокси-2-амино-бензотиазола. *Химическая физика*. 2019. Т. 38. № 12. С. 54–58.
- Донцов А.Е., Сакина Н.Л., Яковлева М.А., Бастратов А.И., Бастракова И.Г., Загоринский А.А., Ушакова Н.А., Фельдман Т.Б., Островский М.А. Оммохромы сложного глаза насекомых: физико-химические свойства и антиоксидантная активность. *Биохимия*. 2020. Т. 85. № 6. С. 783–795.
- Островский М.А., Донцов А.Е. Меланосомы глаза позвоночных и оммохромы глаза беспозвоночных как антиоксидантные клеточные органеллы. *Известия РАН. Серия биологическая*. 2019. № 1. С. 95–108.
- Островский М.А., Зак П.П., Донцов А.Е. Меланосомы глаза позвоночных и оммохромы глаза беспозвоночных как экранирующие клеточные органеллы. *Известия РАН. Серия биологическая*. 2018. № 6. С. 638–648.
- Butenandt A., Schafer W. *Recent Progress in the Chemistry of Natural and Synthetic Coloring Matters and Related Fields*. Eds Gore T.S. Acad. Press. NY. USA. 1962. P. 13–34.  
<https://doi.org/10.1177/004051756303300710>
- Butenandt A., Schiedt U., Biekert E. Über Ommochrome, III. Mitteilung: Synthese des Xanthommatins. *Eur. JOC*. 1954. V. 258 (2). P. 106–116.
- Chiu C.-J., Taylor A. Dietary hyperglycemia, glycemic index and metabolic retinal diseases. *Prog. Retin. Eye Res*. 2011. V. 30 (1). P. 18–53.  
<https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2010.09.001>
- Dontsov A., Koromyslova A., Ostrovsky M., Sakina N. Lipofuscins prepared by modification of photoreceptor cells via glycation or lipid peroxidation show the similar phototoxicity. *World J. Exp. Med*. 2016. V. 6. P. 63–79.
- Dontsov A.E., Fedorovich I.B., Lindstrom M., Ostrovsky M.A. Comparative study of spectral and antioxidant properties of pigments from the eyes of two *Mysis relicta* populations, with different light damage resistance. *J. Comp. Physiol. B*. 1999. V. 169. P. 157–164.
- Dontsov A.E., Ostrovsky M.A. *Screening Eye Pigments as Natural Antioxidants*. Antioxidants in Systems of Varying Complexity: Chemical, Biochemical, and Biological Aspects. Eds Shishkina L.N. et al., CRC Press. Apple Acad. Press Inc. Oakville. Canada; Palm Bay. USA. 2019. P. 141–178.
- Edeas M., Attaf D., Mailfert A.-S., Nasu M., Joubert R. Maillard reaction, mitochondria and oxidative stress: potential role of antioxidants. *Pathol. Biol (Paris)*. 2010. V. 58 (3). P. 220–225.  
<https://doi.org/10.1016/j.patbio.2009.09.011>
- Farmer L.A., Haidasz E.A., Griesser M., and Pratt D.A. Phenoxazine: a privileged scaffold for radical-trapping antioxidants. *J. Org. Chem*. 2017. V. 82. P. 10523–10536.  
<https://doi.org/10.1021/acs.joc.7b02025>
- Figon F., Casas J. Ommochromes in invertebrates: biochemistry and cell biology. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc*. 2019. V. 94. P. 156–183.  
<https://doi.org/10.1111/brv.12441>
- Gugliucci A. Formation of fructose-mediated advanced glycation end products and their roles in metabolic and inflammatory diseases. *Adv. Nutr*. 2017. V. 8. P. 54–62.  
<https://doi.org/10.3945/an.116.013912>
- Insausti T.C., LeGall M., and Lazzari C.R. Oxidative stress, photodamage and the role of screening pigments in insect eyes. *J. Exp. Biol*. 2013. V. 216. P. 3200–3207.  
<https://doi.org/10.1242/jeb.082818>
- Langer H. Properties and functions of screening pigments in insect eyes. *Photoreceptor optics*. Berlin; New York: Springer. 1975. P. 429–455.
- Lapolla A., Traldi P., Fedele D. Importance of measuring products of non-enzymatic glycation of proteins. *Clinical Biochem*. 2005. V. 38 (2). P. 103–115.
- Linzen B. *The tryptophan → ommochrome pathway in insects. I. Advances in insect physiology*. Eds Treheme J.E. N.-Y. Acad. Press. 1974. V. 10. P. 117–246.
- Ostrovsky M.A., Sakina N.L., Dontsov A.E. An antioxidative role of ocular screening pigments. *Vis. Res*. 1987. V. 27. P. 893–899.  
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(87\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90005-8)

- Romero Y., Martinez A. Antiradical capacity of Ommochromes. *J. Mol. Model.* 2015. V. 21. P. 220. <https://doi.org/10.1007/s00894-015-2773-3>
- Suarez G., Maturana J., Oronsky A.L., Raventos-Suarez C. Fructose-induced fluorescence generation of reductively methylated glycosylated bovine serum albumin: evidence for nonenzymatic glycation of Amadori adducts. *Biochim. Biophys. Acta.* 1991. V. 1075. P. 12–19.
- Uchiki T., Weikel K.A., Jiao W., Shang F., Caceres A., Pawlak D., Handa J.T., Brownlee M., Nagaraj R., Taylor A. Glycation-altered proteolysis as a pathobiological mechanism that links dietary glycemic index, aging, and age-related disease (in nondiabetics). *Aging Cell.* 2012. V. 11 (1). P. 1–13. <https://doi.org/10.1111/j.1474-9726.2011.00752.x>
- Ushakova N., Dontsov A., Sakina N., Bastrakov A., Ostrovsky M. Antioxidative properties of melanins and ommochromes from black soldier fly *Hermetia illucens*. *Biomolecules.* 2019. V. 9 (9). P. 408. <https://doi.org/10.3390/biom9090408>

## Ommochromes of the Compound Eye of Insects: Antiglycation Activity

A. E. Dontsov<sup>a,#</sup>, M. A. Yakovleva<sup>a</sup>, and M. A. Ostrovsky<sup>a</sup>

<sup>a</sup> N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics RAS, 119334 Moscow, ul. Kosugina, 4, Russia

<sup>#</sup> E-mail: adontsovnick@yahoo.com

Ommochromes – screening and antioxidant organelles of the compound eye of invertebrates perform the function of light filtration, light absorption and antioxidant protection. In the present work, it was found for the first time that ommochromes exhibit antiglycation activity in vitro. Ommochromes were obtained from the eyes of three different insect families: *Stratiomyidae*, *Sphingidae*, and *Acrididae*. It was shown that all the studied ommochromes inhibited the reaction of formation of fluorescent products of serum albumin modification in the presence of high fructose concentrations (fructosylation). Ommochromes from the eyes of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) were the most effective inhibitors of the fructosylation process. Ommochromes oxidized with hydrogen peroxide did not exhibit an inhibitory effect on the glycation process. The results obtained are of interest both for understanding the biological role of ommochromes in invertebrates, in particular for elucidating their effect on the oxidative modification of proteins of reticular and pigment cells of ommatidium, and for creating pharmacological preparations based on them for the treatment and prevention of pathologies associated with the development of metabolic syndrome.

**Keywords:** ommochromes, insects, glycation, fructosylation

### REFERENCES

- Gribakin F.G., Chesnokova E.G. Ispol'zovanie glaznuch mutantov dly issledovaniy fiziologii zreniy nasekomuch [The use of eye mutants to study the physiology of insect vision]. (*Uspechi sovremennoi biologii*) [Advances in modern biology]. 1984. V. 97. P. 69–82 (in Russian).
- Dontsov A.E., Zak P.P., Ostrovsky M.A., Vospelnikova N.D. Antiglykirovshee deystvie melatonina [Antiglycation activity of melatonin]. (Doklady RAN) [*Doklady Biochemistry and Biophysics*]. 2017. V. 475 (1). P. 283–286 (in Russian).
- Dontsov A.E., Sakina N.L., Kuznetsov Y.V., Ostrovsky M.A. Antioksidantnye i antiglykirovschie svoystva N-acetylcysteinata-6-gidroxy-2-amino-benzotiazola [Antioxidant and antiglycation properties of 6-hydroxy-2-aminobenzothiazole N-acetylcysteinate]. (*Chimicheskay fizika*) [*Russian Journal of Physical Chemistry B*]. 2019. V. 13 (6). P. 947–950 (in Russian).
- Dontsov A.E., Sakina N.L., Yakovleva M.A., Bastrakov A.I., Bastrakova I.G., Zagorinsky A.A., Ushakova N.A., Feldman T.B., Ostrovsky M.A. Ommochromu slozhnogo dlaza nasekomuch, fiziko-chimicheskie svoystva i antyoksidantnaya aktivnost' [Ommochromes of the complex eye of insects: physicochemical properties and antioxidant activity]. (*Biochimiy*) [*Biochemistry*]. 2020. V. 85 (6). P. 783–795 (in Russian).
- Ostrovsky M.A., Dontsov A.E. Melanosomy glaza pozvonochnuch I ommochpomu glaza bespozvonochnuch kak antioksidantnye kletochnye organellu [Vertebrate eye melanosomes and invertebrate eye ommochromes as antioxidant cell organelles: part 2]. (*Izvestiy RAN, seriy biologicheskay*) [*Biology Bulletin*]. 2019. V. 46 (1). P. 105–116 (in Russian).
- Ostrovsky M.A., Zak P.P., Dontsov A.E. Melanosomy glaza pozvonochnuch I ommochpomu glaza bespozvonochnuch kak ekspanipuschie kletochnye organellu [Vertebrate eye melanosomes and invertebrate eye ommochromes as screening cell organelles]. (*Izvestiy RAN, seriy biologicheskay*) [*Biology Bulletin*]. 2018. V. 45. № 6. P. 570–579 (in Russian).
- Butenandt A., Schafer W. *Recent Progress in the Chemistry of Natural and Synthetic Coloring Matters and Related Fields*. Eds Gore T.S. et al., Acad. Press. N.Y., USA. 1962. P. 13–34. <https://doi.org/10.1177/004051756303300710>
- Butenandt A., Schiedt U., Biekert E. *Über Ommochrome, III. Mitteilung: Synthese des Xanthommatins*. Eur-JOC. 1954. V. 258 (2). P. 106–116.
- Chiu C-J., Taylor A. *Dietary hyperglycemia, glycemic index and metabolic retinal diseases*. *Prog. Retin. Eye Res.* 2011. V. 30 (1). P. 18–53. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2010.09.001>
- Dontsov A., Koromyslova A., Ostrovsky M., Sakina N. Lipofuscins prepared by modification of photoreceptor

- cells via glycation or lipid peroxidation show the similar phototoxicity. *World J. Exp. Med.* 2016. V. 6. P. 63–79.
- Dontsov A.E., Fedorovich I.B., Lindstrom M., Ostrovsky M.A. Comparative study of spectral and antioxidant properties of pigments from the eyes of two *Mysis relicta* populations, with different light damage resistance. *J. Comp. Physiol. B.* 1999. V. 169. P. 157–164.
- Dontsov A.E., Ostrovsky M.A. Screening Eye Pigments as Natural Antioxidants. Antioxidants in Systems of Varying Complexity: Chemical, Biochemical, and Biological Aspects. Eds Shishkina L.N. et al. Apple Acad. Press Inc. Oakville. Canada; *Palm Bay. USA.* 2019. P. 141–178.
- Edeas M., Attaf D., Mailfert A.-S., Nasu M., Joubert R. Maillard reaction, mitochondria and oxidative stress: potential role of antioxidants. *Pathol. Biol. (Paris)*. 2010. V. 58 (3). P. 220–225.  
<https://doi.org/10.1016/j.patbio.2009.09.011>
- Farmer L.A., Haidasz E.A., Griesser M., and Pratt D.A. Phenoxazine: a privileged scaffold for radical-trapping antioxidants. *J. Org. Chem.* 2017. V. 82. P. 10523–10536.  
<https://doi.org/10.1021/acs.joc.7b02025>
- Figon F., Casas J. Ommochromes in invertebrates: biochemistry and cell biology. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 2019. V. 94. P. 156–183.  
<https://doi.org/10.1111/brv.12441>
- Gugliucci A. Formation of fructose-mediated advanced glycation end products and their roles in metabolic and inflammatory diseases. *Adv. Nutr.* 2017. V. 8. P. 54–62.  
<https://doi.org/10.3945/an.116.013912>
- Insausti T.C., LeGall M., and Lazzari C.R. Oxidative stress, photodamage and the role of screening pigments in insect eyes. *J. Exp. Biol.* 2013. V. 216. P. 3200–3207.  
<https://doi.org/10.1242/jeb.082818>
- Langer H. Properties and functions of screening pigments in insect eyes. *Photoreceptor optics*. Berlin; New York: Springer. 1975. P. 429–455.
- Lapolla A., Traldi P., Fedele D. Importance of measuring products of non-enzymatic glycation of proteins. *Clinical Biochem.* 2005. V. 38 (2). P. 103–115.
- Linzen B. *The tryptophan → ommochrome pathway in insects. I.* Advances in insect physiology. Eds Treheme J.E. et al. N.Y. Acad. Press. 1974. V. 10. P. 117–246.
- Ostrovsky M.A., Sakina N.L., Dontsov A.E. An antioxidative role of ocular screening pigments. *Vis. Res.* 1987. V. 27. P. 893–899.  
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(87\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90005-8)
- Romero Y., Martinez A. Antiradical capacity of Ommochromes. *J. Mol. Model.* 2015. V. 21. P. 220.  
<https://doi.org/10.1007/s00894-015-2773-3>
- Suarez G., Maturana J., Oronsky A.L., Raventos-Suarez C. Fructose-induced fluorescence generation of reductively methylated glycated bovine serum albumin: evidence for nonenzymatic glycation of Amadori adducts. *Biochim. Biophys. Acta.* 1991. V. 1075. P. 12–19.
- Uchiki T., Weikel K.A., Jiao W., Shang F., Caceres A., Pawlak D., Handa J.T., Brownlee M., Nagaraj R., Taylor A. Glycation-altered proteolysis as a pathobiological mechanism that links dietary glycemic index, aging, and age-related disease (in nondiabetics). *Aging Cell.* 2012. V. 11 (1). P. 1–13.  
<https://doi.org/10.1111/j.1474-9726.2011.00752.x>
- Ushakova N., Dontsov A., Sakina N., Bastrakov A., Ostrovsky M. Antioxidative properties of melanins and ommochromes from black soldier fly *Hermetia illucens*. *Biomolecules.* 2019. V. 9 (9). P. 408.  
<https://doi.org/10.3390/biom9090408>

УДК 612.84

## НЕЙРОНЫ *TECTUM OPTICUM* РЫБ, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ПОДБОР АДЕКВАТНОЙ СТИМУЛЯЦИИ

© 2021 г. А. А. Зайчикова<sup>1,\*</sup>, И. Дамянович<sup>1</sup>, П. В. Максимов<sup>1</sup>, А. Т. Алипер<sup>1</sup>, Е. М. Максимова<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 127051 Москва, Большой Каретный переулок, д. 19, Россия

\*E-mail: zaichikova\_alisa@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 19.10.2020 г.

Принята к публикации 02.11.2020 г.

У всех животных *tectum opticum* (ТО) (или “верхнее двухолмие” у млекопитающих) обеспечивает руководство внешним вниманием, что является не единственной функцией тектума, однако критически важно для развития поведенческих зрительно обусловленных реакций. У рыб ТО является главным первичным зрительным центром. От сетчатки в него поступают сигналы подавляющего числа ганглиозных клеток (ГК) разных (известных) типов. Для понимания механизмов организации поведения важно знать свойства нейронов собственно ТО, как структурные, так и физиологические. Мы регистрировали экстраклеточно электрическую активность в ТО живой взрослой рыбы (*Carassius auratus gibelio*). Были записаны одновременно реакции ГК сетчатки (от терминалей их аксонов) и собственно тектальных нейронов (ТН), вероятно, от тел клеток. Описано четыре типа ТН с дирекциональной избирательностью (ДИ) (такие нейроны далее – ДИ ТН) на разных (определенных) глубинах в ТО. Кроме них (поверхностно) одновременно с реакциями каудоростральных ДИ ГК при одном положении электрода регулярно отводятся редкие спорадические импульсы, не имеющие ДИ и возникающие при стимуляции в любом месте большой площади. Это предположительно реакции поверхностных тектальных нейронов (*superficial inhibitory neurons*) – “SIN”. Для появления четко выраженных реакций “SIN” был произведен перебор различных видов стимуляции. Сопоставление результатов наших электрофизиологических исследований с литературными данными (большинство работ в этом направлении выполнено методом кальциевого имаджинга на прозрачных мальках данио рерио (*Danio rerio*)) позволяет отождествить ДИ ТН с глутаматэргическими перивентрикулярными интернейронами ТО, а “SIN” – с ГАМК-эргическими тормозными интернейронами (SIN). Последние предположительно обеспечивают выделение главного объекта (pop-out) в поле зрения.

**Ключевые слова:** *tectum opticum*, рыбы, зрение, сетчатка, дирекциональная избирательность, тектальные нейроны

DOI: 10.31857/S0235009221010108

### ВВЕДЕНИЕ

Выходными нейронами сетчатки являются ганглиозные клетки (ГК), передающие информацию о картине мира от сетчатки на нейроны *tectum opticum* (ТО), которые являются первичным зрительным центром у рыб. Одной из функций тектума у всех животных является руководство внешним вниманием, что необходимо для запуска поведенческих программ в текущей ситуации (Northmore, 2011). Для успешного выбора поведенческой реакции необходим механизм “обнаружения признаков”.

Для тектума характерна слоистая структура, в его ретинореципиентном слое расположены аксональные терминалы ГК, тела и окончания тектальных нейронов (ТН). Полное покрытие рецепторного поля сетчатки дендритными ветвлениями ГК каждого из 13 типов (“tiling”), а также ретинотопический принцип передачи информа-

ции от ГК к нейронам ТО позволяют выделить значимые признаки изображения и сохранить упорядоченность передачи визуальной информации (Максимов и др., 2005; 2009; Maximov et al., 2005; Maximova et al., 2012; Damjanović et al., 2009). Для осмысления работы зрительной системы необходимо изучить взаимосвязи между ГК и ТН, т.е. как происходит дальнейшее преобразование сигналов от ГК нейронами ТО.

На данный момент передача зрительной информации в сетчатке изучена лучше, чем последующая ее обработка в первичных зрительных центрах. Нейроны тектума менее изучены: большая часть информации о ТН – это морфологические сведения, полученные на мальках *Danio rerio*, которые относятся к тому же семейству, что и караси (Nevin, 2010; Walker et al., 2013; Barker, Baier, 2015). Однако есть и электрофизиологические данные, полученные разными методами. При помощи методики пэтч-кламп на мальках данио

**Таблица 1.** Средние значения глубин расположения реакций ТН разных типов и ДИ ГК

Тип элемента	Средняя глубина расположения $\pm$ ст. ошибка среднего, мкм	Медиана и интерквартильный размах, мкм
“SIN”, $n = 28$	$41 \pm 24$	20–55 (медиана = 39)
ДИ ГК, $n = 130$	$54 \pm 18$	40–64 (медиана = 53)
Первая группа ДИ ТН, $n = 18$	$113 \pm 56$	75–147 (медиана = 106.5)
Вторая группа ДИ ТН, $n = 19$	$282 \pm 59$	239–335 (медиана = 266)

Примечание:  $n$  – количество одиночных отведений. Представлены также медиана и интерквартильный размах для каждой выборки, по данным работы (Damjanović et al., 2019) (в таблицу были также добавлены новые данные по нескольким ТН).

были исследованы ТН при появлении в поле зрения малька объекта, похожего на добычу (Preuss et al., 2014). Поведенческие опыты в сочетании с экстраклеточным отведением от нейронов тектума на рыбах-брызгунах были использованы для изучения механизмов выделения главного стимула (pop-out) во всей визуальной картине (Ben-Tov et al., 2015; Kardamakis et al., 2015). Было описано несколько типов тектальных нейронов, содержащих разные медиаторы, о функциях таких ТН высказываются различные предположения (Gabriel et al., 2012; Barker, Baier, 2013; Preuss et al., 2014).

Дирекционально-избирательные ГК (ДИ ГК) сетчатки реагируют на движение стимула в определенном направлении. Электрофизиологическим методом были также описаны дирекционально-избирательные ТН (ДИ ТН), своими свойствами ДИ ТН очень схожие с ГК (сходная контрастная чувствительность, разрешающая способность) (Damjanović et al., 2019). Они так же, как и ДИ ГК, реагируют на движение разнообразных стимулов: широкие движущиеся границы, полосы, пятна, основное для таких элементов – это движение любого стимула в предпочтительном для нейрона направлении. В ходе экспериментальной работы были выделены четыре группы ДИ ТН с разными предпочтительными направлениями. Предпочтительные направления движения стимула трех групп ТН (каудоростральное, дорсовентральное и вентродорсальное) в точности совпадали с направлениями, известными для ДИ ГК. Тектальные нейроны четвертой группы имели ростокаудальное предпочтительное направление, которое отсутствует у ДИ ГК (рис. 1). На рисунке данные для ДИ ГК представлены синим цветом,  $n = 299$  (только караси), данные для ДИ ТН – серым,  $n = 117$  (98 – карась, 19 – карп). Из 117 тектальных нейронов 39 относились к ДИ ТН 1-й группы, которые в тектуме расположены на глубине около 100 мкм, и 78 к ДИ ТН 2-й группы, расположенных на глубине около 300 мкм (точные значения глубин приведены в табл. 1)<sup>1</sup>. В отличие от ДИ ГК, ДИ ТН являются элементами on-off-ти-

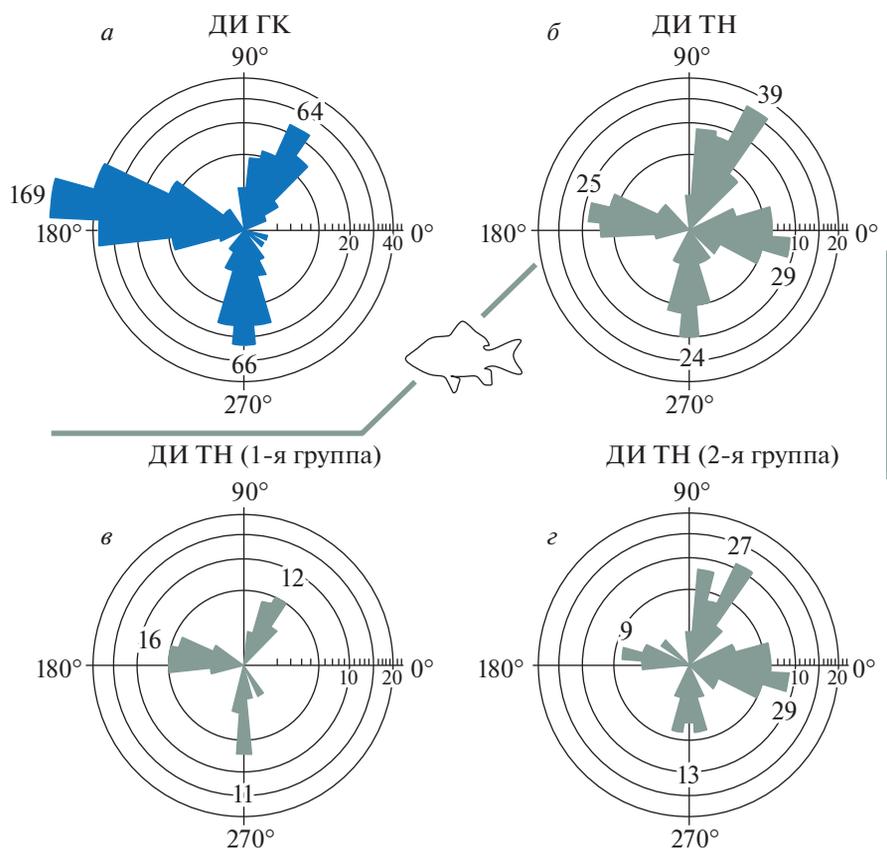
па, т.е. безразличны к знаку контраста, тогда как ДИ ГК у рыб бывают либо on-, либо off-типа.

На данный момент мы уже знаем, как соотносятся глубины залегания аксональных терминалей ГК и ТН в тектуме (Aliper et al., 2019; Damjanović et al., 2019). Так, было показано, что реакции ДИ ГК и ДИ ТН регистрируются на разных глубинах. ДИ ГК расположены в поверхностных подслоях ретино-реципиентного слоя ТО. В свою очередь реакции ДИ ТН могут быть зарегистрированы на нескольких уровнях: в том подслое ретино-реципиентного слоя, где также расположены детекторы ориентированных линий и детекторы пятна, и под подслоем аксональных терминалей ГК с темновой и световой фоновой активностью (средняя глубина расположения = 195 мкм). Данные о точных значениях глубин представлены в табл. 1, сформированной на основе результатов работы (Damjanović et al., 2019).

Большая часть входов от сетчатки приходит в слои SO и SFGS (SO – stratum opticum, SFGS – stratum fibrosum et griseum superficiale) (Robles et al., 2013). Вся визуальная информация далее передается в более глубокие слои ТО, откуда поступает уже в двигательные центры среднего и заднего мозга. В глубоких слоях ТО, в основном в перивентрикулярном слое (SPV – stratum periventriculare), находятся тела так называемых перивентрикулярных тектальных нейронов (PVN), дендриты части таких нейронов восходят в SFGS (Northmore, 2011). Большая часть PVN является глутаматэргическими (Kinoshita et al., 2006). Описано два класса PVN: перивентрикулярные проекционные нейроны (PVPN) и перивентрикулярные интернейроны (PVIN). Дендритные ветвления интернейронов не выходят за пределы тектума. Часть интернейронов посылает свои отростки в поверхностные ретинореципиентные слои. В свою очередь проекционные PVN образуют синапсы с интернейронами в глубоких слоях ТО, а свои эфферентные аксоны посылают в премоторные и моторные области мозга (Nevin et al., 2010).

Помимо перивентрикулярных ТН у мальков данио при использовании метода кальциевого имаджинга были описаны поверхностные ГАМК-эргические интернейроны (SIN – superficial inhibitory neurons). Тела SIN, по морфологическим данным, расположены в слое SO, а отросток густо

<sup>1</sup> В данной статье пересмотрены названия групп ДИ ТН: в статье (Damjanović et al., 2019) ДИ ТН были разделены на поверхностные и глубокие. Поверхностные ДИ ТН теперь названы ДИ ТН 1-й группы, глубокие – ДИ ТН 2-й группы.



**Рис. 1.** Гистограммы распределения типов нейронов с разными предпочтительными направлениями представлены в полярных координатах (модифицированный рисунок по (Damjanović et al., 2019)). *a* – ДИ ГК; *б* – ДИ ТН; *в* – ДИ ТН 1-й группы; *г* – ДИ ТН 2-й группы.

ветвится в одной плоскости сразу под телом клетки на самой поверхности ретино-реципиентного слоя (Vene et al., 2010). Такие нейроны получают входы как от аксональных окончаний ГК, так и от тектальных PVN (Barker, Baier, 2013). Предполагается, что SIN участвуют в настройке восприятия объектов определенного размера, оказывая ингибиторные влияния.

При помощи метода микроэлектродной экстраклеточной регистрации, использованного в данном исследовании, можно отводить импульсные реакции как ГК, так и ТН. Важно отметить, что в том числе возможна одновременная регистрация реакций ГК и тектальных нейронов в одном положении микроэлектрода. Это позволяет нам изучать, как именно передается и обрабатывается зрительная информация на разных уровнях между различными элементами зрительной системы. В данной работе были использованы взрослые особи карасей и карпов. Однако у нас есть все основания сравнивать наши электрофизиологические данные с литературными, полученными на мальках данио, так как малек, по сути, уже сформировавшееся животное. Наши данные по стратификации реакций от аксональных окончаний ГК разных типов совпадают с таковыми, полученными на данио методом кальциевого

имаджинга (Nikolaou et al., 2012). Электрофизиологический метод, примененный на взрослых карасях и карпах, используется много лет и зарекомендовал себя как очень информативный. Полученные сведения могут быть полезны в дальнейших исследованиях в этой области, в том числе с использованием иных методов.

Зная входы (реакции ГК), на следующем этапе исследований является естественным посмотреть, как преобразуются (используются) эти сигналы нейронами ТО. Для корректного описания свойств ТН разных типов первоначально было необходимо подобрать адекватную стимуляцию. Без этого невозможно определить большинство параметров (например, размер рецептивного поля, его положение), которые необходимы для сравнения свойств ТН и ГК. Ранее, чтобы сравнить глубины залегания аксональных терминалей ГК и собственно ТН, было произведено измерение глубины отведений (Aliper et al., 2019).

Поскольку SIN в литературе приписывают функцию выделения ror-out стимула, на основании морфологических и нейромедиаторных свойств, и эта гипотеза, на наш взгляд, выглядит логичной, мы попытались изучить и свойства электрических реакций этих нейронов.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

### *Экспериментальные объекты и подготовка*

Работа выполнена на представителях двух видов рыб сем. Карповые (Cyprinidae): серебряный карась (*Carassius gibelio*) и обыкновенный карп (*Cyprinus carpio*) из подмосковных рыбных хозяйств. Размер тела животных в длину — 10–15 см, масса — от 40 до 100 г. В эксперименте было 36 особей (и 533 записи реакций ГК и ТН из базы данных). До начала эксперимента в течение нескольких месяцев животные находились в аэрируемых лабораторных аквариумах при комнатной температуре и естественном режиме освещения.

Во время проведения эксперимента животное с нормальным кровообращением и неповрежденной зрительной системой обездвигивали внутримышечной инъекцией d-тубокурарина (0.3 мг/100 г массы тела). Далее животное закрепляли в естественном положении (в котором караси и карпы перемещаются в воде) в прозрачном аквариуме из плексигласа, с принудительным протоком аэрированной воды через жабры. Циркуляция обеспечивалась насосом с термостатом. Животное смотрело через прозрачную стенку аквариума правым глазом на экран монитора, на котором предъявляли компьютер-генерируемые стимулы. Для доступа к ТО участок головы рыбы анестезировали льдом, после чего удаляли теменно-затылочную кость с левой стороны черепа контралатерально относительно правого “рабочего глаза”. Далее убирали жировую клетчатку, твердую и мягкую мозговые оболочки. Уровень воды в экспериментальном аквариуме поддерживался так, чтобы вода не попадала в мозг, однако глаза рыбы находились под водой.

### *Экспериментальная установка и зрительная стимуляция*

Экспериментальная установка состояла из трех связанных синхронизированных компьютерных модулей: стимулирующего, регистрирующего и командного. Стимулирующий модуль обслуживал 17-дюймовый ЭЛТ-монитор LG Flatron 775FT, где отображались зрительные стимулы. Монитор располагали на подвижном столике, что позволяло перемещать его. Расстояние от монитора до глаза рыбы составляло 30–40 см. Работы проводили в основном в боковых полях зрения животного в довольно широком угле: свыше 60° по вертикали и 40° по горизонтали. Область стимуляции на экране монитора была ограничена квадратом со стороной 11 угловых градусов, размер области и ее положение на экране можно было изменять. В области стимуляции отображались программно-генерируемые стимулы (движущиеся границы, полосы, мерцающие пятна и другие), остальная часть монитора оставалась неизменной с постоянной яркостью. В данной работе использовали только “ахроматические” цве-

та (черный, белый, многочисленные градации серого). Командный модуль был предназначен для графического представления результатов on-line, экспресс-обработки и для оперативного управления параметрами стимуляции и регистрации. Регистрирующий модуль соединяли через АЦП (аналогово-цифровой преобразователь; частота дискретизации 25 кГц) и усилитель с микроэлектродом. Модуль служил для регистрации реакций нейронов, выведения картин импульсной активности на экран, прослушивания реакций при помощи динамики и записи в память результатов эксперимента. В процессе опыта велся автопротокол, кроме того, производилась off-line обработка данных по разработанной ранее схеме. В данной работе методика описана кратко. Подробно методика описана в статье (Максимов и др., 2005).

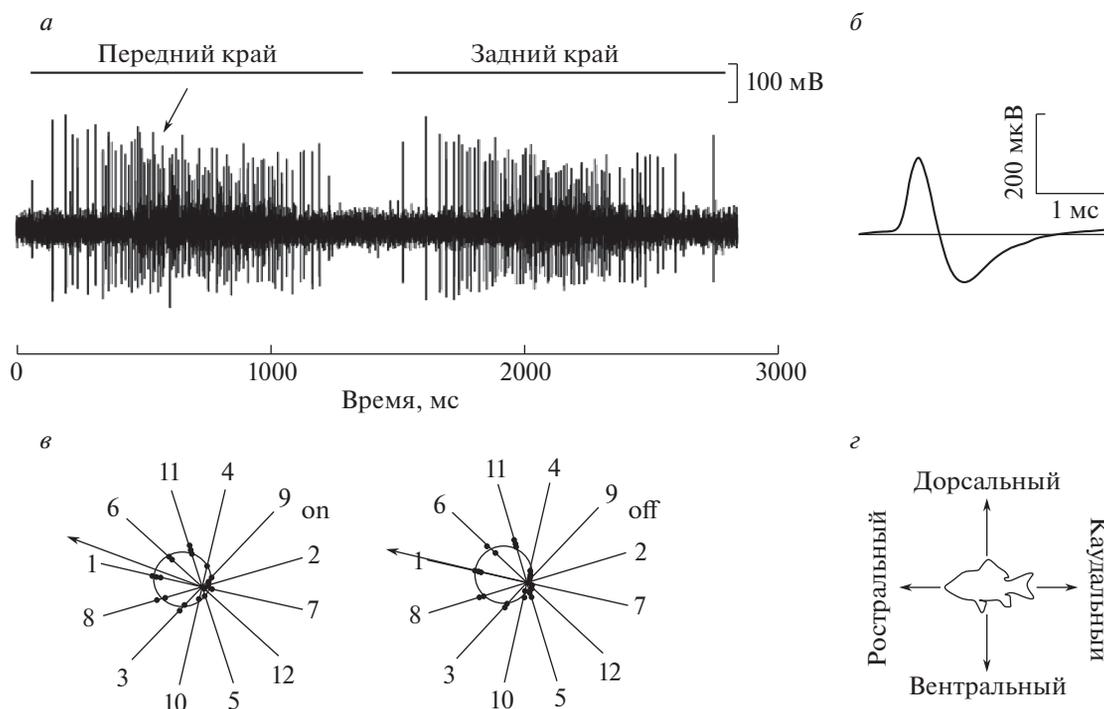
### *Регистрация клеточных реакций*

Регистрация одиночных реакций от аксональных терминалей ГК сетчатки и ТН в ТО живой рыбы происходила при помощи внеклеточного заключенного в стекло металлического микроэлектрода (диаметр платиновой шляпки 2–3 мкм, сопротивление не более 300 кОм) (Gesteland et al., 1959). Электрод погружали под визуальным контролем микроманипулятором (MP-225, Sutter Instrument), реакции просматривались и прослушивались при помощи осциллографа (С1-73) и громкоговорителя соответственно. Шум на входе значительно уменьшался при контакте электрода с жидкостью над поверхностью тектума. Далее электрод аккуратно погружали по градиенту звука до получения стабильного одиночного отведения. Глубина записи оценивалась с использованием показаний на экране микроманипулятора. Об одиночности отведения судили по высоте и стабильности амплитуды импульсов, а также по стабильному звуковому тембру. Величина спайков одиночного элемента составляла порядка 200–500 мкВ (для реакций ГК) и превышала шум в несколько раз.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Общие сведения о тектальных нейронах*

В ходе эксперимента в ретино-реципиентном слое ТО реакции ТН встречаются реже, чем реакции аксональных терминалей ГК. В нашей обширной базе данных содержатся тысячи записей о ГК и сотни о ТН. Одиночные отведения реакций аксональных терминалей ГК и ТН отличаются по ряду характеристик импульсной активности: амплитуде и форме импульсов, размерам рецептивных полей. Типичный ответ ТН, зарегистрированный в ТО живой рыбы, показан на рис. 2, а на примере дирекционально-избирательного ТН с предпочтительным направлением движения стимула от хвоста к голове (каудоростральное направление). Стимулом являлась широкая



**Рис. 2.** Характеристики импульсной активности ТН на примере каудорострального ДИ ТН. *a* – импульсная активность ТН в ответ на стимуляцию; *b* – форма усредненного импульса ТН в расширенной временной шкале; *в* – полярные диаграммы; *г* – положение рыбы.

черная полоса, превышающая размер области стимуляции, движущаяся по светлomu фону области стимуляции при темной периферии. Реакция наблюдается и на вход, и на выход контрастной границы (т.е. на изменение контраста стимула, увеличения или уменьшения относительно фона), соответственно, это элемент on-off типа. Можно также отметить, что у импульсной активности ТН есть характерная особенность – амплитуда спайков существенно уменьшается при увеличении частоты их возникновения в разряде (рис. 2, *a*; пример выделен стрелкой).

На рис. 2, *b* представлена форма спайка ТН – двухфазная. Подобная форма импульса характерна для регистрации от тела клетки. У ГК в свою очередь спайки трехфазные с отклонением в отрицательную сторону в начале (Максимова и др., 2012).

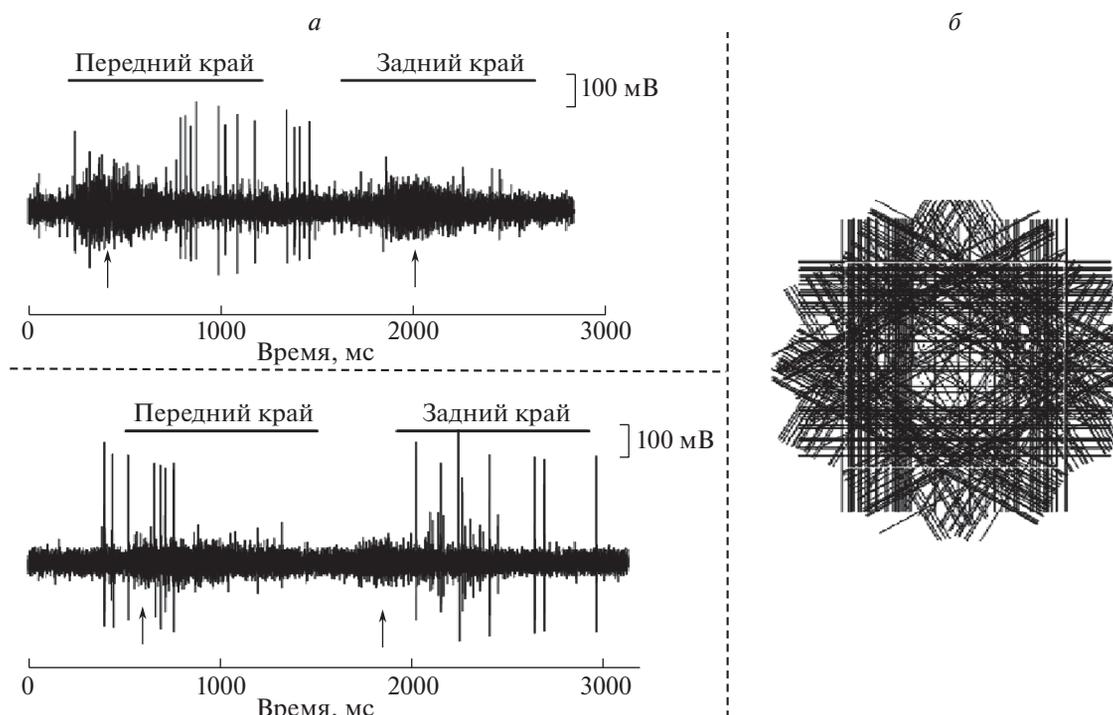
О предпочтительном направлении движения для данного нейрона можно судить по полярным диаграммам (рис. 2, *в*). Полярные диаграммы – это зависимость числа импульсов в реакции от направления движения стимула. На левой панели представлена диаграмма ответов на выход темного стимула из РП элемента – реакция на посветление РП (on-реакция), на правой – на вход темного стимула в РП элемента – реакция на затемнение РП (off-реакция).

Длительный разряд указывает на большой размер рецептивного поля (РП) тектального нейрона (рис. 2, *a*), что является еще одним различием между ДИ ТН и ДИ ГК: у тектальных нейронов РП намного больше, чем у ГК (размер РП рети-

нальных элементов порядка 4.5°, РП тектальных нейронов может быть до 60°). Это заметно, поскольку залп ответа ГК всегда помещается в окно области стимуляции (квадрат со стороной 11°), в то время как залп нейрона может быть ограничен этим окном, так как его РП больше (Maximova et al., 2012).

### Поверхностные тектальные нейроны

Помимо дирекционально-избирательных тектальных нейронов в ТО встречаются реакции так же ТН другого типа – не имеющие дирекциональной избирательности. В ходе эксперимента при погружении электрода в ТО их реакции появляются первыми и достигают максимальной амплитуды на той же глубине, что и ответы ДИ ГК с каудоростральным предпочтительным направлением. Мы предполагаем, что регистрируем реакцию описанных в литературе ГАМК-эргических SIN, поэтому в дальнейшем будем называть такие поверхностные тектальные нейроны “SIN” (предположительно SIN). В сравнении с ДИ ГК, у “SIN” гораздо меньше импульсов в разряде, помимо этого импульсы в ответ на предъявление стандартных тестирующих стимулов нерегулярные (рис. 3, *a*). Стимулами являлись белая (*a* – верхняя панель) и черная (нижняя панель) широкие полосы, превышающие размер области стимуляции, движущиеся по светло-серому фону области стимуляции и темной периферии. Стрелками отмечены импульсные активности ДИ ГК, через РП которой движутся стимулы.



**Рис. 3.** Сравнение импульсной активности одновременно регистрируемых аксональных терминалей ГК и “SIN”. *a* – импульсная активность “SIN” и ДИ ГК в ответ на стимуляцию; *б* – запись импульсной активности “SIN” при совпадении центра его РП с центром РП ДИ ГК (каждая черная черта – наличие импульса в ответ на движение стимула в данном направлении).

Если ДИ ТН мы могли исследовать уже отрабатанной системой стимуляции ГК, иногда только требовалось увеличить область стимуляции, то для таких ТН в ходе электрофизиологических экспериментов еще не была подобрана адекватная стимуляция. Реакции на различные стимулы могут появляться при зрительной стимуляции почти на всей площади экрана монитора, поэтому можно сказать, что РП “SIN” большое.

Реперной точкой для картирования РП “SIN” может служить положение РП ДИ ГК. Эти нейроны (“SIN”) реагируют на выход стимула из области их рецептивного поля, что видно на рис. 3, *б*, где отсутствуют импульсы в центральной части области стимуляции. Такая картина импульсной активности получается только, когда центры РП ДИ ГК и “SIN” совпадают. В данном случае стимулом являлась светлая движущаяся граница при темном фоне области стимуляции.

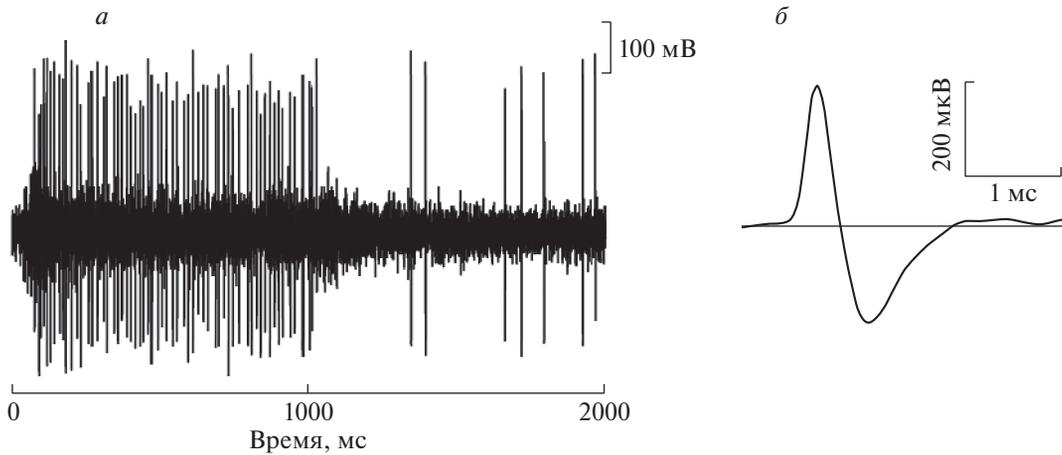
Процесс подбора адекватной стимуляции при отсутствии каких-либо сведений о нейроне (ГК, ТН) в общем случае начинается со стимуляции от руки. Для первоначальной стимуляции был выбран стимул черная полоса (черная картонная полоска). Полоску помещали на периферии предполагаемого центра поля нейрона, и при ее выдвигении от окна области стимуляции к краям экрана монитора наблюдался регулярный мощный разряд тектального нейрона. На рис. 4, *а* представлен регулярный разряд “SIN”, который

впервые удалось вызвать и записать при стимуляции описанным выше способом.

При этом в ходе эксперимента было отмечено, что наиболее ярко выраженные ответы возникают при движении стимула от области стимуляции, в границах которой предположительно заключен центр РП “SIN” к краям экрана монитора. Исходя из этого была создана схема стимуляции, представленная на рис. 5: область стимуляции перемещали от центрального положения далее по его периметру.

Центральное положение окна области стимуляции представлено голубым квадратом, оно являлось как начальным, так и конечным положением области стимуляции. От центра окно последовательно перемещали по координатной сетке ( $x, y$ ; темно-красные оси) вправо и далее по часовой стрелке по периметру центрального положения – серые квадраты. Черным пунктиром объединены импульсные активности ТН, относящиеся к одному положению окна на координатной сетке. Во время эксперимента голубая и серые области прилегают друг к другу вплотную, разнесение на данной схеме сделано во избежание наложения картин импульсной активности.

В каждом из положений области стимуляции производились стимуляция нейрона и запись его реакции в ответ на движение стимула к периферии экрана монитора, в угловых позициях использовалось несколько направлений движения стимула. Стимулом являлась широкая черная по-



**Рис. 4.** Импульсная активность поверхностного ТН – “SIN”. *а* – “регулярная” импульсная активность “SIN” при стимуляции черной полосой (черная картонная полоска), предъявляемой “от руки”; *б* – двухфазная форма импульса “SIN”.

лоса, превышающая размер области стимуляции, движущаяся по светлому фону области стимуляции при темной периферии. Направления движения стимула при данном положении области стимуляции отмечено синими стрелками.

В результате последовательного перемещения окна стимуляции и записи реакций “SIN” получались карты импульсной активности нейрона, пример такой карты представлен на рис. 5.

На рис. 5 реакции, отводимые от аксональной терминали ДИ ГК, видны как расширение фоновой полосы шума, а импульсы ТН имеют большую амплитуду. Так как область стимуляции сцентрирована относительно одновременно регистрируемой каудоростральной ДИ ГК, на средней записи в центральной пунктирной рамке отсутствует ретинальная активность, поскольку стимул двигался в ростокаудальном направлении (противоположном предпочтительному для данной ДИ ГК). Регулярные реакции “SIN” видны в ответ на осветление дальней периферии рецептивного поля при неизменном освещении его центра (импульсы меньшей амплитуды принадлежат другому нейрону).

### ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов мы время от времени регистрируем реакции нейронов тектума на разных уровнях ТО, но мы не имеем возможности метить нейроны, от которых происходит регистрация клеточной активности. Поэтому для построения гипотез и высказывания предположений о функциях ТН, реакции которых мы регистрируем, мы опираемся на литературные данные с использованием иных методик. Чаще всего это данные, полученные на мальках данио с использованием кальциевого имаджинга. Однако так же существуют работы, выполненные с использованием генетических методов визуализации нейро-

нов, и регистрация электрической активности отдельных нейронов пэтч-кларпом.

Согласно данным, полученным нами ранее, ДИ ТН карасей и карпов по результатам статистического анализа можно разделить на две группы – более поверхностные на глубинах порядка 100 мкм и более глубокие – на глубине порядка 300 мкм (Aliper et al., 2019; Damjanović et al., 2019).

При этом мы наблюдаем двухфазную форму импульса, характерную для регистрации от тела нейрона (Maximova et al., 2012). Таким образом, вероятно, аксональные окончания ГК образуют синапсы не на теле глубоких ДИ ТН, а на их восходящих дендритах. В морфологических работах было показано, что существуют нейроны с телами в перивентрикулярном слое ТО и восходящими в ретино-реципиентный слой дендритами (Gabriel et al., 2012; Nikolaou et al., 2015). Такие нейроны – глутаматергические интернейроны с дендритными ветвлениями в SFGS (Robles et al., 2011).

Дирекционально-избирательные тектальные нейроны, по всей видимости, объединяют входы от ДИ ГК. ДИ ТН трех типов (у карасей и карпов) с теми же предпочтительными направлениями движения стимула, что и у ДИ ГК, получают информацию напрямую от соответствующих ДИ ГК. Четвертый тип ДИ ТН, выделяющий ростокаудальное направление, вероятно, комбинирует неким образом поступающую к нему от ГК информацию.

Можно предположить различные варианты возникновения четвертого, ростокаудального, направления. Во-первых, селективность по данному направлению может быть сформирована путем комбинирования входных сигналов от вентродорсальных и дорсовентральных ДИ ГК сетчатки. Во-вторых, возможно, что ростокаудальное предпочтительное направление формируется полностью на уровне тектума с использованием входной информации от ГК без ДИ (Grana, Engert, 2012). В таком случае это происходит при помощи асимметричного торможения в ТО – Грама

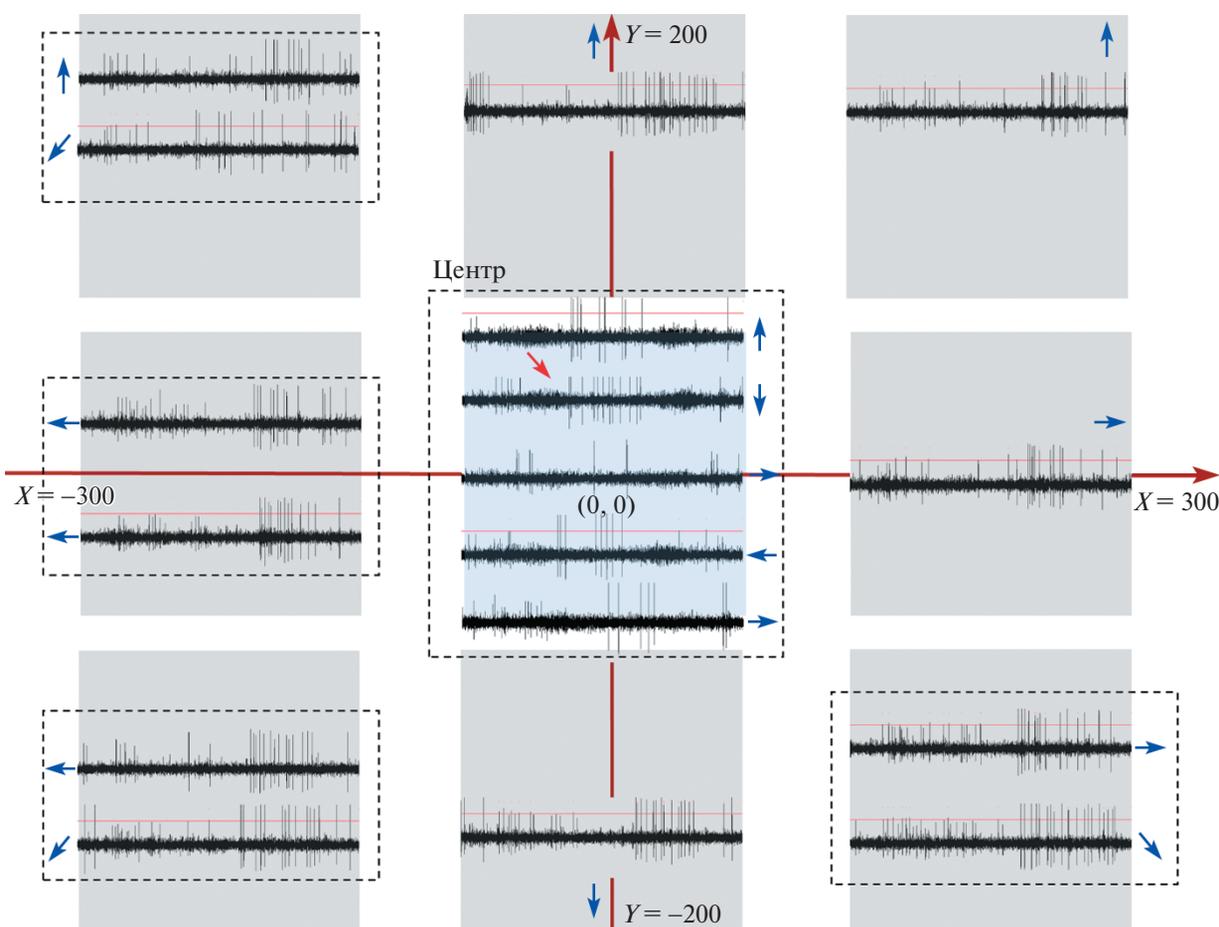


Рис. 5. Схематическое изображение экрана монитора с импульсной активностью “SIN”. Описание рисунка в тексте.

и соавт. предположили, что существует особый тип ингибирующего тектального интернейрона. Такой интернейрон ассиметрично связан с ДИ ТН и реагирует на стимулы, движущиеся в нулевом направлении (т.е. в противоположном относительно предпочтительного).

У *Danio rerio* ДИ ТН также можно разделить на четыре физиологических подтипа с различными предпочтительными направлениями, сходными с теми, что были зарегистрированы у взрослых карасей и карпов (Hunter et al., 2013). В том числе и ростокаудальные ДИ ТН, явно не присутствующие во входных сигналах сетчатки.

В SO помимо аксонов ГК расположены также тела поверхностных ТН – в англоязычной литературе SIN – superficial inhibitory neurons. Эти нейроны являются ГАМК-эргическими (Bene et al., 2010). Они обнаруживаются и на препаратах, окрашенных по Гольджи (Lazarević et al., 1998), и различными методами визуализации, например кальциевым имаджингом (Barker, Baier, 2013; Bene et al., 2010). О функции SIN в литературе существует несколько гипотез, которые по большей части основаны на предположении о наличии сходства SIN и звездчатых амакриновых клеток сетчатки (ЗАК). Морфологически их сходство за-

ключается в наличии крупного центрально симметричного дендритного ветвления, расположенного только в одном слое. Некоторые авторы утверждают, что SIN обладают дирекциональной избирательностью (Hunter et al., 2013; Yin et al., 2019). Однако за все время проведения электрофизиологических экспериментов мы не видели у поверхностных ТН, которые мы считаем предположительно SIN (“SIN”), предпочтений в направлении движения стимула.

Согласно одной из гипотез, проводящей аналогию между SIN и ЗАК, SIN могли бы обеспечивать торможение зрительного поля между двумя подтипами нейронов, настроенных на крупные и мелкие объекты (Preuss et al., 2014). Другими словами, ГАМК-эргические SIN рассматривают как часть системы распознавания объектов различных размеров в поле зрения, что является ключевым моментом для запуска подходящей поведенческой программы.

Другая гипотеза предполагает, что SIN, функционируя по принципу ЗАК, участвуют в формировании связей, позволяющих выделять ростокаудальное направление. В этом случае SIN должны формировать удаленные связи с ДИ ТН, которые расположены глубже в ТО. Известно,

что перивентрикулярные нейроны как раз посылают длинные дендриты в верхние слои тектума, такие как SO и SFGS. Таким образом, SIN могут формировать ГАМК-эргические синапсы на дендритах ДИ ТН, так же как ЗАК формируют на дендритах ДИ ГК.

Еще одна гипотеза так же связана с выделением признаков объекта, однако на другом уровне: предполагается, что SIN могут участвовать в выделении наиболее значимого стимула в своем поле зрения (pop-out стимул) по механизму “winner-take-all” (Preuss et al., 2014). Данный механизм работает при наличии в поле зрения нескольких конкурирующих стимулов, выбор между ними происходит за счет латерального торможения соседних областей ТО, которые получают ретинальные проекции от разных частей поля зрения.

При помощи этой гипотезы можно попытаться дать объяснение картине, наблюдаемой на рис. 5. Данная карта импульсной активности является наиболее удачным вариантом из восьми сделанных для различных “SIN” (всего было зарегистрировано и проанализировано порядка 20 “SIN”). Для остальных нейронов карту сделать сложнее, так как не была точно разработана схема стимуляции, из-за чего положения окна стимуляции не были точно выверены, а записи реакций были частично пропущены.

Можно предположить, что каждый импульс поверхностного ТН (“SIN”) – это момент выделения ГАМК, т.е. торможение. “SIN” в центральной части области стимуляции, расположенной по положению центра РП ДИ ГК off-типа, не выдает регулярной импульсации, т.е. не оказывает тормозных влияний, таким образом пропуская сигнал от этого ДИ ГК off-типа дальше. Как заметно на визуализации импульсной активности, одновременно с активностью ДИ ГК спайков ТН либо нет, либо очень мало (рис. 5, пример отмечен красной стрелкой). Однако на периферии картина иная: возникают регулярные залпы “SIN”, которые в случае существования в этой области поля зрения рыбы иных стимулов затормозят реакции ГК, “смотрящих” на них. Следовательно, “SIN” как бы пропускает информацию от ГК-детектора признака о наиболее значимом стимуле (pop-out стимул) в поле зрения в данный момент.

Мы получили первые регулярные ответы при одном из многочисленных испробованных способов стимуляции. Данный прогресс являлся стимулом для продолжения экспериментальной деятельности в этом направлении. Очевидно, что для оптимизации экспериментальной работы и получения большего количества визуализаций импульсной активности “SIN” необходимо создание нового программного инструмента. Такой инструмент позволил бы автоматически обмерять реакции “SIN” на движение стимула в периферической области РП. Например, можно представить инструмент следующим образом: стимул в

форме черного кольца изначально расположен в области стимуляции, где предположительно заключен центр РП нейрона, далее кольцо увеличивается в диаметре и освобождает более светлую периферию. Так мы имитируем движение стимула от границ области стимуляции (и центра РП) к периферии, но только со всех сторон относительно области стимуляции (на рис. 5, от голубого центрального квадрата к периферии экрана). Такая стимуляция подтвердит или опровергнет нашу трактовку причины появления реакции “SIN”.

Тектальные нейроны, таким образом, связаны как минимум с некоторыми типами ретинальных элементов, такими как ДИ ГК. Помимо этого ТН реагируют на маленькие стимулы (размером чуть больше  $1^\circ$ ) так же, как и собственно ретинальные детекторы пятен. Однако в тектальной активности нами практически не было отмечено активности, связанной с ориентационно-избирательными ГК (детекторы ориентированных линий: горизонтальных и вертикальных), несмотря на то, что часть ДИ ТН расположена на одном с ними уровне (Aliper et al., 2019). В литературе есть данные кальциевого имиджинга об ориентационно-избирательных нейронах в ТО (Hunter et al., 2013).

Необходимо дальнейшее изучение функций тектальных нейронов, расположенных в ТО на различных уровнях. Для лучшего понимания роли “SIN”, которые мы считаем предположительно SIN, нужно определить, с какими ретинальными элементами, а также с какими ТН других типов они образуют связи собственно в тектуме. Кроме того, создание программного инструмента для стимуляции таких “SIN”, вероятно, позволит выявить адекватную стимуляцию для ТН такого типа, что приблизит нас к пониманию функций данных нейронов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 20-015-00063).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Максимов В.В., Максимова Е.М., Максимов П.В. Классификация дирекционально-избирательных элементов, регистрируемых в тектуме карася. *Сенсорные системы*. 2005. Т. 19. № 4. С. 322–335.
- Максимов В.В., Максимова Е.М., Максимов П.В. Классификация ориентационно-избирательных элементов, проецирующихся в тектум карася. *Сенсорные системы*. 2009. Т. 23. № 1. С. 13–23.
- Aliper A.T., Zaichikova A.A., Damjanović I., Maximov P.V., Kasparson A.A., Gačić Z., Maximova E.M. Updated functional segregation of retinal ganglion cell projections in the tectum of a cyprinid fish – further elaboration based on microelectrode recordings. *Fish Physiol. Biochem.* 2019. V. 45. № 2. P. 773–792.
- Barker A.J., Baier H. SINs and SOMs: neural microcircuits for size tuning in the zebrafish and mouse visual pathway. *Front. Neural Circuits*. 2013. V. 7. P. 89.

- Barker A.J., Baier H. Sensorimotor decision making in the zebrafish tectum. *Curr. Biol.* 2015. V. 25. № 21. P. 2804–2814.
- Ben-Tov M., Donchin O., Ben-Shahar O., Segev R. Pop-out in visual search of moving targets in the archer fish. *Nat. Commun.* 2015. V. 6. № 1. P. 1–11.
- Bene F. Del, Wyart C., Robles E., Tran A., Looger L., Scott E.K., Isacoff E.Y., Baier H. Filtering of visual information in the tectum by an identified neural circuit. *Science*. 2010. V. 330. № 6004. P. 669–673.
- Damjanović I., Maximova E.M., Maximov V.V. On the organization of receptive fields of orientation-selective units recorded in the fish tectum. *J. Integr. Neurosci.* 2009. V. 8. P. 323–344.
- Damjanović I., Maximov P., Aliper A., Zaichikova A., Gačić Z., Maximova E. Putative targets of direction-selective retinal ganglion cells in the tectum opticum of cyprinid fish. *Brain Research*. 2019. V. 1708. 1 April 2019. P. 20–26.
- Gabriel J.P., Trivedi C.A., Maurer C.M., Ryu S., Bollmann J.H. Layer-Specific Targeting of Direction-Selective Neurons in the Zebrafish Optic Tectum. *Neuron*. 2012. V. 76. № 6. P. 1147–1160.
- Gesteland R.C., Lettvin J.Y., Howland B., Howland B., Pitts W.H. Comments on Microelectrodes. *Proc. IRE*. 1959. V. 47. № 11. P. 1856–1862.
- Grama A., Engert F. Direction selectivity in the larval zebrafish tectum is mediated by asymmetric inhibition. *Front. Neural Circuits*. 2012. V. 6. № September. P. 59.
- Hunter P.R., Lowe A.S., Thompson I.D., Meyer M.P. Emergent properties of the optic tectum revealed by population analysis of direction and orientation selectivity. *J. Neurosci.* 2013a. V. 33. № 35. P. 13940–13945.
- Kardamakis A.A., Saitoh K., Grillner S. Tectal microcircuit generating visual selection commands on gaze-controlling neurons. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2015. V. 112. № 15. P. E1956–E1965.
- Kinoshita M., Ito E. Roles of periventricular neurons in retinotectal transmission in the optic tectum. *Prog. Neurobiol.* 2006. V. 79. № 2. P. 112–121.
- Lazarević L., Rogač L. and Rakić L. Citoarchitectonic analysis of tectum opticum in *Serranus scriba*. *Iugoslavica Physiologica et Pharmacologica Acta*. 1998. V. 34 (2). P. 335–341.
- Maximov V.V., Maximova E.M., Maximov P.V. Direction selectivity in the goldfish tectum revisited. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2005. V. 1048. P. 198–205.
- Maximova E., Pushchin I., Maximov P., Maximov V. Pre-synaptic and postsynaptic single-unit responses in the goldfish tectum as revealed by a reversible synaptic transmission blocker. *J. Integr. Neurosci.* 2012. V. 11. № 2. P. 183–191.
- Nevin L.M., Robles E., Baier H., Scott E.K. Focusing on optic tectum circuitry through the lens of genetics. *BMC Biol.* 2010. V. 8. № 1. P. 126.
- Nikolaou N., Lowe A.S., Walker A.S., Abbas F., Hunter P.R., Thompson I.D., Meyer M.P. Parametric Functional Maps of Visual Inputs to the Tectum. *Neuron*. 2012. V. 76. № 2. P. 317–324.
- Nikolaou N., Meyer M.P. Lamination Speeds the Functional Development of Visual Circuits. *Neuron*. 2015. V. 88. № 5. P. 999–1013.
- Northmore D.P.M. The Optic Tectum. In *Encyclopedia of Fish Physiology: From Genome to Environment*. Под ред. Farrell A.P. *Elsevier*. 2011. P. 131–142.
- Preuss S.J., Trivedi C.A., Berg-Maurer C.M. Vom, Ryu S., Bollmann J.H. Classification of object size in retinotectal microcircuits. *Curr. Biol.* 2014. V. 24. № 20. P. 2376–2385.
- Robles E., Filosa A., Baier H. Precise lamination of retinal axons generates multiple parallel input pathways in the tectum. *J. Neurosci.* 2013. V. 33. № 11. P. 5027–5039.
- Robles E., Smith S.J., Baier H. Characterization of genetically targeted neuron types in the zebrafish optic tectum. *Front. Neural Circuits*. 2011. V. 5. № FEB.
- Walker A.S., Burrone J., Meyer M.P. Functional imaging in the zebrafish retinotectal system using RGECO. *Front. Neural Circuits*. 2013. V. 7. P. 34.
- Yin C., Li X., Du J. Optic tectal superficial interneurons detect motion in larval zebrafish. *Protein Cell*. 2019. V. 10. P. 238–248.

## Visual neurons of fish tectum opticum, their extracellular spike activity and search for their adequate stimulation

A. A. Zaichikova<sup>a, #</sup>, I. Damjanovic<sup>a</sup>, P. V. Maximov<sup>a</sup>, A. T. Aliper<sup>a</sup>, and E. M. Maximova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences, 127051 Moscow, Bolshoy Karetny per., 19, Russia

<sup>#</sup> E-mail: zaichikova\_alisa@mail.ru

Tectum opticum (TO) of different animals is known to guide their external attention that is crucial for the organization of behavioral responses. In fish, TO is a main primary visual center. Vast majority of retinal ganglion cells (98%) (GCs) send their signals there, as inputs to tectal neurons proper. The responses of the retinal GCs (from the axonal terminals) and the tectal neurons (TN) (probably from the cell bodies) were recorded extracellularly in the TO of a living adult fish (*Carassius auratus gibelio*). Four types of directional selective TN (DS TN) were described at different (certain) depths in TO. In addition to them, rare sporadic neuronal spikes were recorded simultaneously with the responses of caudo-rostral DS GCs, i.e. rather superficially. These responses occur during stimulation in any place of a large area, are not directional selective and presumably belong to superficial inhibitory neurons (SIN) situated in stratum opticum of TO. To evoke the regular responses to repeat stimulation we tried a lot of stimuli configurations. At last we succeed. We compare our electrophysiological results with ones obtained by many authors with diverse methods on zebrafish larvae. According to our results we identify DS TN with glutamatergic periventricular tectal interneurons, and

“SIN” – with superficial inhibitory GABA-ergic interneurons, that participate in selection of the main (pop-out) object in the visual field and drawing attention to it.

*Key words:* tectum opticum, fish, vision, retina, directional selectivity, tectal neurons

REFERENCES

- Maksimov V.V., Maksimova E.M., Maksimov P.V. Klassifikaciya direktsional'no-izbiratel'nyh elementov, registriruemyyh v tektume karasya (Classification of direction-selective elements recorded in goldfish tectum). *Sensornyye sistemy* (Sensory systems). 2005. V. 19. № 4. P. 342–356 (in Russian).
- Maximov V.V., Maximova E.M., Maximov P.V. Classification of direction-selective units recorded in the goldfish tectum. *Sensornyye Sistemy* (Sensory systems). 2005. V. 19. P. 322–335 (in Russian).
- Maximov V.V., Maximova E.M., Maximov P.V. Classification of orientation-selective units recorded in the gold fish tectum. *Sensornyye Sistemy* (Sensory systems). 2009. V. 23. P. 13–23 (in Russian).
- Aliper A.T., Zaichikova A.A., Damjanović I., Maximov P.V., Kasparson A.A., Gačić Z., Maximova E.M. Updated functional segregation of retinal ganglion cell projections in the tectum of a cyprinid fish—further elaboration based on microelectrode recordings. *Fish Physiol. Biochem.* 2019. V. 45. № 2. P. 773–792.
- Barker A.J., Baier H. SINS and SOMs: neural microcircuits for size tuning in the zebrafish and mouse visual pathway. *Front. Neural Circuits.* 2013. V. 7. P. 89.
- Barker A.J., Baier H. Sensorimotor decision making in the zebrafish tectum. *Curr. Biol.* 2015. V. 25. № 21. P. 2804–2814.
- Ben-Tov M., Donchin O., Ben-Shahar O., Segev R. Pop-out in visual search of moving targets in the archer fish. *Nat. Commun.* 2015. V. 6. № 1. P. 1–11.
- Bene F. Del, Wyart C., Robles E., Tran A., Looger L., Scott E.K., Isacoff E.Y., Baier H. Filtering of visual information in the tectum by an identified neural circuit. *Science.* 2010. V. 330. № 6004. P. 669–673.
- Damjanović I., Maximova E.M., Maximov V.V. On the organization of receptive fields of orientation-selective units recorded in the fish tectum. *J. Integr. Neurosci.* 2009. V. 8. P. 323–344.
- Damjanović I., Maximov P., Aliper A., Zaichikova A., Gačić Z., Maximova E. Putative targets of direction-selective retinal ganglion cells in the tectum opticum of cyprinid fish. *Brain Research.* 2019. V. 1708. 1 April 2019. P. 20–26.
- Gabriel J.P., Trivedi C.A., Maurer C.M., Ryu S., Bollmann J.H. Layer-Specific Targeting of Direction-Selective Neurons in the Zebrafish Optic Tectum. *Neuron.* 2012. V. 76. № 6. P. 1147–1160.
- Gesteland R.C., Lettvin J.Y., Howland B., Howland B., Pitts W.H. Comments on Microelectrodes. *Proc. IRE.* 1959. V. 47. № 11. P. 1856–1862.
- Gramma A., Engert F. Direction selectivity in the larval zebrafish tectum is mediated by asymmetric inhibition. *Front. Neural Circuits.* 2012. V. 6. № September. P. 59.
- Hunter P.R., Lowe A.S., Thompson I.D., Meyer M.P. Emergent properties of the optic tectum revealed by population analysis of direction and orientation selectivity. *J. Neurosci.* 2013a. V. 33. № 35. P. 13940–13945.
- Kardamakis A.A., Saitoh K., Grillner S. Tectal microcircuit generating visual selection commands on gaze-controlling neurons. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2015. V. 112. № 15. P. E1956–E1965.
- Kinoshita M., Ito E. Roles of periventricular neurons in retinotectal transmission in the optic tectum. *Prog. Neurobiol.* 2006. V. 79. № 2. P. 112–121.
- Lazarević L., Rogač L. and Rakić L. Citoarchitetonic analysis of tectum opticum in *Serranus scriba*. *Iugoslavica Physiologica et Pharmacologica Acta.* 1998. V. 34 (2). P. 335–341.
- Maximov V.V., Maximova E.M., Maximov P.V. Direction selectivity in the goldfish tectum revisited. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2005. V. 1048. P. 198–205.
- Maximova E., Pushchin I., Maximov P., Maximov V. Pre-synaptic and postsynaptic single-unit responses in the goldfish tectum as revealed by a reversible synaptic transmission blocker. *J. Integr. Neurosci.* 2012. V. 11. № 2. P. 183–191.
- Nevin L.M., Robles E., Baier H., Scott E.K. Focusing on optic tectum circuitry through the lens of genetics. *BMC Biol.* 2010. V. 8. № 1. P. 126.
- Nikolaou N., Lowe A.S., Walker A.S., Abbas F., Hunter P.R., Thompson I.D., Meyer M.P. Parametric Functional Maps of Visual Inputs to the Tectum. *Neuron.* 2012. V. 76. № 2. P. 317–324.
- Nikolaou N., Meyer M.P. Lamination Speeds the Functional Development of Visual Circuits. *Neuron.* 2015. V. 88. № 5. P. 999–1013.
- Northmore D.P.M. *The Optic Tectum. In Encyclopedia of Fish Physiology: From Genome to Environment.* Eds Farrell A.P. Elsevier. 2011. P. 131–142.
- Preuss S.J., Trivedi C.A., Berg-Maurer C.M. Vom, Ryu S., Bollmann J.H. Classification of object size in retinotectal microcircuits. *Curr. Biol.* 2014. V. 24. № 20. P. 2376–2385.
- Robles E., Filosa A., Baier H. Precise lamination of retinal axons generates multiple parallel input pathways in the tectum. *J. Neurosci.* 2013. V. 33. № 11. P. 5027–5039.
- Robles E., Smith S.J., Baier H. Characterization of genetically targeted neuron types in the zebrafish optic tectum. *Front. Neural Circuits.* 2011. V. 5. № FEB.
- Walker A.S., Burrone J., Meyer M.P. Functional imaging in the zebrafish retinotectal system using RGEKO. *Front. Neural Circuits.* 2013. V. 7. P. 34.
- Yin C., Li X., Du J. Optic tectal superficial interneurons detect motion in larval zebrafish. *Protein Cell.* 2019. V. 10. P. 238–248.

УДК 159.931 + 595.722

## ДАУНРЕГУЛЯЦИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТ-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЗРИТЕЛЬНОГО ПИГМЕНТА ТАРАКАНА УМЕНЬШАЕТ ЭФФЕКТ МАСКИНГА ПРИ КОРОТКОВОЛНОВОМ ОСВЕЩЕНИИ

© 2021 г. Е. С. Новикова<sup>1</sup>, И. Ю. Северина<sup>1</sup>, И. Л. Исавнина<sup>1</sup>, М. И. Жуковская<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН,  
194223 Санкт-Петербург, пр. Тореза, 44, Россия

\*E-mail: mzhukovskaya@yahoo.com

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 24.06.2020 г.

Принята к публикации 22.07.2020 г.

Свет, попадающий в глаз насекомого, несет информацию не только о форме и цвете окружающих предметов, но и об общем уровне освещения, регулируя суточные и сезонные ритмы физиологических функций. Освещение американского таракана ярким светом в ночную фазу суточного цикла приводит к возникновению эффекта маскинга, наиболее заметным проявлением которого были периоды полной неподвижности – замирания. Подавление экспрессии ультрафиолет-чувствительного зрительного пигмента таракана методом РНК-интерференции достоверно уменьшало эффект маскинга, приводя к сокращению длительности замираний. Наблюдаемые изменения в поведении оказались небольшими по величине вследствие малого остаточного количества ультрафиолет-чувствительного опсина.

*Ключевые слова:* зрительный пигмент, РНК-интерференция, поведение, маскинг, таракан

**DOI:** 10.31857/S0235009221010066

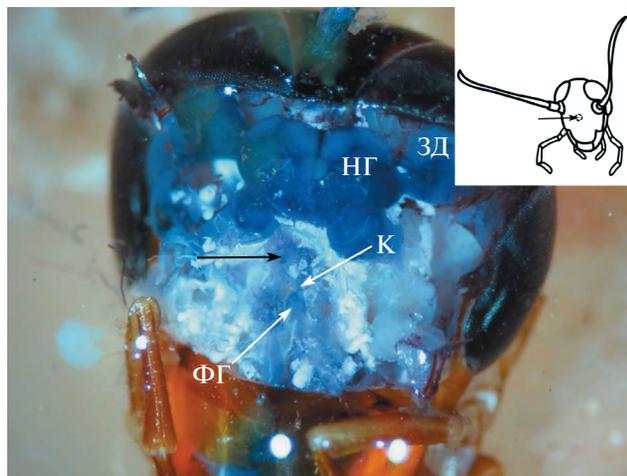
### ВВЕДЕНИЕ

Синантропные насекомые обитают в жилищах, а также в других зданиях – складах, помещениях промышленных и сельскохозяйственных предприятий, офисных помещениях, в транспортных средствах. Адаптация видов к обитанию рядом с человеком идет постепенно, от временного присутствия внутри или вблизи построек до облигатного развития в присутствии человека. Синантропные насекомые более всего подвержены изменениям, вносимым человеком в окружающую среду. Условия освещения, включая интенсивность, спектральный состав и суточную динамику, меняются стремительно, воздействие этих изменений на насекомых изучено недостаточно.

Свет, попадающий в глаза насекомого, помимо информации о характеристиках окружающих предметов, регулирует суточные и сезонные ритмы активности. Накапливающиеся к настоящему времени данные свидетельствуют о том, что свет разной длины волны запускает определенные поведенческие реакции (Song, Lee, 2018) напрямую или взаимодействует с системой внутренних часов насекомого. Американский таракан, *Periplaneta americana* L. – широко распространенный синантропный вид, активен преимущественно в

первой половине ночи, причем половозрелые самцы уходят достаточно далеко от дневных убежищ, предпочитая возвращаться каждый раз в одно и то же место перед началом дня. Нимфы, и особенно самки, несущие оотеку, покидают убежище не каждую ночь и проводят вне его гораздо меньше времени (Bell, Adiyodi, 1982; Laurent Salazar et al., 2015).

Тараканы избегают яркого света, при этом наибольший эффект вызывается коротковолновым излучением (Kelly, Mote, 1990). Свет эти насекомые воспринимают двумя парами фоторецепторных органов – крупными сложными глазами и простыми глазками. Сложные глаза американского таракана имеют фоторецепторы двух спектральных типов с максимумами чувствительности в 365 и 507 нм (Mote, Goldsmith, 1970; Butler, 1971). Большинство дневных насекомых имеют аппозиционные глаза в противоположность суперпозиционным глазам ночных насекомых (Грибакин, 1981), однако, аппозиционные глаза американского таракана приспособлены к работе в условиях низкой освещенности (Greiner, 2006; Heimonen et al., 2012). Сложные глаза, помимо зрительной информации об окружающем мире, участвуют в организации суточных ритмов (Page, 1982) и в выборе затененного



**Рис. 1.** Морфологический контроль. Удален участок головной капсулы (кутикулы) с фронтальной части головы таракана. НГ – надглоточный ганглий, ЗД – зрительные доли, ФГ – фронтальный ганглий, К – коннектива. Черная стрелка – место инъекции. На врезке показана область инъекции.

убежища (Okada, Toh, 1998). Развитие глазков в ходе онтогенеза сопровождается резким ростом и усложнением нервных связей в процессе имагинальной линьки, что может свидетельствовать об участии органов в организации полета (Toh, Yokohari, 1988) или другом поведении, связанном с размножением. При внезапном освещении убежища в дневное время тараканы покидают его, разбегаясь в разных направлениях (Laurent Salazar et al., 2013). В своих наблюдениях за американскими тараканами мы обнаружили, что при освещении люминесцентной лампой холодного света и при невозможности скрыться самцы американского таракана замедляют свое движение и замирают (Новикова, Жуковская, 2017). Поскольку фоторецепторы таракана экспрессируют ультрафиолетчувствительный (pUVO) и два зеленочувствительных зрительных пигмента (pGO1, pGO2) (French et al., 2015), дальнейшие исследования были направлены на определение спектрального состава света, вызывающего такую реакцию. Оказалось, что именно коротковолновое освещение приводит к появлению замираний, в то время как длинноволновое вызывает усиление локомоторной активности, однако, свет любого спектрального состава большой интенсивности вызывает эффект замирания (Zhukovskaya et al., 2017). Разработка молекулярных методов манипулирования уровнем зрительных пигментов позволила показать, что подавление экспрессии зеленочувствительного опсина при помощи РНК-интерференции приводит к уменьшению его уровня в глазу таракана на 97% и электроретинограммы – на 75% (French et al., 2015). Чувствительность к коротковолновому освещению при использовании

этого метода для УФ-чувствительного опсина снижалась на 91% при внутриклеточных отведениях (Saari et al., 2018). Таким образом, экспериментальное снижение уровней зрительных пигментов таракана вызывает существенное уменьшение чувствительности фоторецепторов обоих спектральных классов.

Цель настоящей работы – определить влияние снижения количества УФ-чувствительного зрительного пигмента в фоторецепторах на поведение тараканов при освещении коротковолновым светом.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нимф самцов последнего возраста американского таракана отбирали из лабораторной колонии и выдерживали при инвертированном фоторежиме 12:12 ч (свет: темнота), температуре 24–28°C до линьки на имаго; вода и пища присутствовали постоянно. После имагинальной линьки насекомых отсаживали в экспериментальную установку.

При помощи микропипетки инъецировали 1.5 мл раствора двуцепочечной РНК против опсина в Рингере концентрацией 4 мг/мл в клипеус таракана (рис. 1, врезка) по центру немного ниже линии, соединяющей антеннальные впадины, как было описано ранее (French et al., 2015; Saari et al., 2018). Эксперименты начинали через 14 дней после инъекции. Продолжительность экспериментов составляла две недели.

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Для морфологического контроля использовали 2 мл смеси 1:1 двуцепочечной РНК и 10% раствора хлористого никеля. Было проведено девять инъекций. Через час после инъекции проводили вскрытие головной капсулы и удаляли участок кутикулы с фронтальной области головы. После удаления кутикулы окраску хлористого никеля проявляли с использованием спиртового раствора рубеоановой кислоты (Delcomyn, 1981). Место введения и повреждение тканей оценивали при помощи стереомикроскопа Stemi 2000 и фотографировали камерой Canon PS G-15.

Вольер размером 300 × 450 × 300 мм, в котором находились вода и пища, был постоянно соединен с затемненным убежищем размером 170 × 170 × 55 мм проходом 40 × 40 мм (Новикова, Жуковская, 2017). Инвертированный фоторежим 12:12 создавали с применением лампы накаливания 25 Вт, температуру поддерживали в диапазоне 23–26°C.

Перед началом эксперимента к вольеру присоединяли тестовую камеру размером 200 × 200 × 80 мм, освещаемую темно-красным светом при

помощи светодиодного фотофонаря “Рубин-3” (производства ЗАО НПО “Интротест”, Россия) в режиме низкой освещенности. Подъемная дверца отделяла тестовую камеру от вольера. Стандартная увлажненная воздушная смесь, содержащая 20% кислорода и 80% азота, подавалась в камеру со скоростью 100 мл/мин. Регистрацию поведения проводили при помощи черно-белой видеокамеры VSC-756 USB (производства компании “ЭВС”, Россия) с разрешением  $740 \times 576$  пикселей и частотой 25 кадров/с. Видеокамеру располагали на высоте 300 мм от пола тестовой камеры. Анализ видеофайлов производился покадрово с использованием программы Virtual.Dub (Lee A Virtual.Dub <http://www.virtual.dub.org/index.html>).

Эксперименты проводили в первой половине темновой фазы суточного цикла. Одно насекомое впускали в тестовую камеру, после чего дверцу закрывали. Через 10 мин начинали видеорегистрацию. Эксперимент состоял из двух 30-минутных сессий, разделенных 10-минутным перерывом. В первой сессии дополнительных источников освещения, помимо темно-красной фоновой подсветки, к которой тараканы практически нечувствительны, не было. Во второй сессии включали ультрафиолетовое светодиодное освещение низкой интенсивности, создающее световой поток  $2.8 \times 10^{10}$  фотон/см<sup>2</sup> × с (Zhukovskaya et al., 2017).

Было выполнено три серии экспериментов.

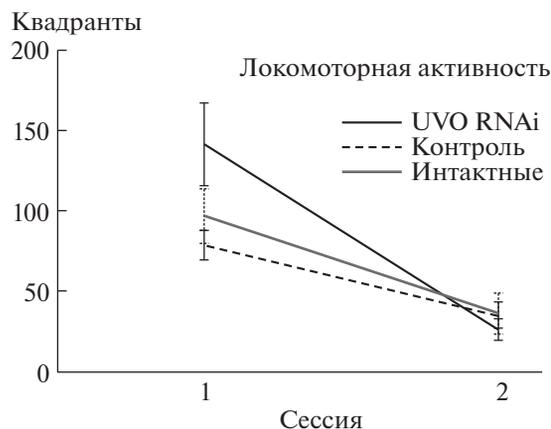
Интактная – животные находились без инъекций,  $N = 12$ .

Контрольная – тараканам инъецировали раствор Рингера,  $N = 17$ .

Опытная – тараканам вводили раствор двуцепочечной РНК против УФ-чувствительного опсина,  $N = 12$ .

Локомоторную активность подсчитывали как число посещенных квадрантов, оценивали количество и длительность остановок, замираний, а также параметры груминга (Новикова, Жуковская, 2017). Остановки определяли, как состояния, при которых животное, находясь на одном месте, совершало характерные сканирующие движения антеннами, а замирания – как периоды полной неподвижности (Новикова, Жуковская, 2017).

Статистическую обработку данных начинали с проверки выборок на нормальность распределения при помощи теста Колмогорова–Смирнова. Поскольку распределение выборок не отличалось от нормального, применяли методы параметрической статистики: Т-критерий Стьюдента, двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA. Критерий Хи-квадрат применяли для сравнения распределений. Достоверными считали различия при  $p < 0.05$ .



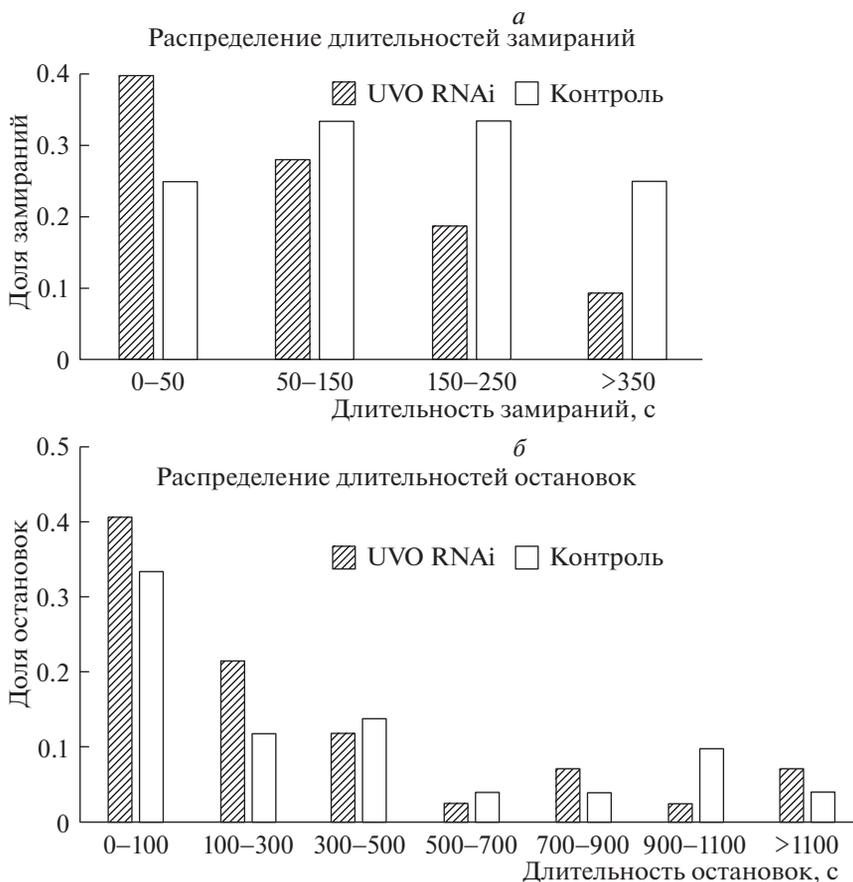
**Рис. 2.** Локомоторная активность. Число квадрантов, посещенных за сессию. UVO RNAi – инъекция двуцепочечной РНК против УФ-чувствительного опсина, опытная группа, контроль – инъекция раствора Рингера. Данные представлены как средние  $\pm$  ошибка среднего.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При морфологическом контроле было обнаружено, что место инъекции находилось ниже надглоточного ганглия и ни у одного из тараканов не наблюдалось каких-либо его повреждений (рис. 1). Весь надглоточный ганглий был интенсивно окрашен. У одного насекомого была повреждена коннектива, которая соединяет надглоточный и фронтальный ганглии, возможно, в процессе препарирования.

Анализ локомоторной активности показал, что тараканы, которым была сделана инъекция двуцепочечной РНК против УФ-чувствительного опсина, были более подвижны в первой сессии при фоновой подсветке темно-красным светом, чем насекомые контрольной группы (рис. 2). При коротковолновом освещении локомоторная активность снижалась в опытной и контрольной сериях до сходных значений. Контрольные животные, получившие инъекцию раствора Рингера, не отличались от интактных. Двухфакторный дисперсионный анализ выявил значимые различия как между контрольной и опытной сериями ( $F_{1/57} = 4.15$ ,  $p < 0.05$ ), так и между последовательными сессиями обеих серий ( $F_{1/57} = 31.62$ ,  $p < 0.0001$ ), взаимодействие факторов также оказалось достоверным ( $F_{1/57} = 7.37$ ,  $p < 0.01$ ).

Периоды полной неподвижности, замирания, наблюдались у тараканов всех трех групп при освещении коротковолновым светом. В первой сессии кратковременные замирания отмечены лишь для одного животного в опытной серии. Во вторых сессиях замирания наблюдались во всех сериях экспериментов, однако после инъекции двуцепочечной РНК против УФ опсина макси-



**Рис. 3.** Распределения длительностей замираний (а) и остановок (б) тараканов при коротковолновом освещении во вторых сессиях экспериментов. UVO RNAi – инъекция двуцепочечной РНК против УФ-чувствительного опсина, опытная группа, контроль – инъекция раствора Рингера.

мум распределения смещался в сторону увеличения доли коротких замираний по сравнению с контролем (Хи-квадрат,  $p < 0.01$ , рис. 3, а). Количество остановок увеличивалось во второй сессии экспериментов сходным образом для интактной, контрольной и опытных групп ( $p < 0.01$ , Т-критерий Стьюдента). Длительность остановок также росла во второй сессии, но для интактных животных достоверность различий не была определена из-за их малого количества в первой сессии. Различий между контрольной и опытной группами при освещении по параметрам остановок не обнаружено (Хи-квадрат,  $p > 0.05$ , рис. 3, б).

Количество актов груминга антенн, а также их длительность не изменялись при экспериментальных воздействиях. При этом количество и длительность чисток антенн уменьшались во вторых сессиях как контрольных, так и опытных экспериментов (Т-тест Стьюдента,  $p < 0.001$ ), что сходно с интактными животными ( $p < 0.01$ ). Общая продолжительность груминга была примерно одинаковой во всех сериях и не различалась между сессиями (табл. 1). Последовательности

груминга – чистки разных частей тела подряд, увеличивались как по количеству очищаемых органов, так и по длительности (сходно во всех сериях экспериментов) (табл. 2).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Использованный метод введения двуцепочечной РНК не нарушает целостность надглоточного ганглия и только в редких случаях может приводить к изменению поведения из-за частичного нарушения функций фронтального ганглия. Фронтальный ганглий является центром стоматогастрической системы, и при его повреждении нарушается процесс глотания пищи и воды. При удалении фронтального ганглия у тараканов может наблюдаться обезвоживание (Penzlin, 1971). Поскольку ни у одного из тараканов контрольной и опытной серий не наблюдались признаки обезвоживания, можно заключить, что фронтальный ганглий и его коннективы не имели существенных повреждений при инъекции. Изменения груминга были сходными для всех серий и могут рассматриваться как возникновение стресса новиз-

**Таблица 1.** Суммарное время груминга разных частей тела таракана. Звездочками обозначены достоверные различия между сессиями одного и того же эксперимента (Т-критерий Стьюдента, \* –  $p < 0.05$ , \*\* –  $p < 0.01$ , \*\*\* –  $p < 0.001$ ).

Экспериментальные группы	сессия	Суммарное время чисток, с					
		Антенны	Основания антенн	Передние ноги	Средние и задние ноги	Церки	Сумма
Интактные	1	75.92 ± 10.04	12.17 ± 8.61	55.92 ± 17.01	42.5 ± 11.52	2.33 ± 1.41	188.83 ± 32.93
	2	48.42 ± 9.75**	24.75 ± 7.55	54.33 ± 9.85	36.42 ± 7.36	3 ± 1.14	166.92 ± 26.2
Контроль	1	72.25 ± 7.77	20.08 ± 5.93	64.33 ± 7.05	52.67 ± 10.8	3.67 ± 1.99	213 ± 22.32
	2	33.67 ± 10.38*	12.25 ± 7.5	35.92 ± 16.73	44.08 ± 20.23	8.17 ± 4.96	134.08 ± 47.83
Опыт	1	82.92 ± 12.08	8.75 ± 4.02	44.42 ± 12.53	32.42 ± 10.14	0.08 ± 0.08	168.58 ± 35.34
	2	48.33 ± 9.12**	19.83 ± 5.47	57.83 ± 11.94	47.5 ± 13.08	3.67 ± 3.49	177.17 ± 33.45

**Таблица 2.** Параметры последовательностей груминга. Статистические различия обозначены как в табл. 1

Экспериментальные группы	Сессия	Н последовательностей	Длительность последовательности	Н элементов в каждой последовательности
Интактные	1	6.42 ± 0.73	22.14 ± 3.13	3.85 ± 0.51
	2	3.67 ± 0.54*	42.11 ± 6.03**	7.13 ± 1.01**
Контроль	1	6.06 ± 0.64	29.62 ± 3.24	4.3 ± 0.47
	2	2.94 ± 0.7**	72.51 ± 10.87***	7.3 ± 0.82***
Опыт	1	4.25 ± 0.8	28.48 ± 3.95	3.95 ± 0.47
	2	2.92 ± 0.5	64.13 ± 12.72*	7.75 ± 1.64*

ны при входе в тестовую камеру и его угасание во второй сессии экспериментов всех серий (Zhukovskaya, 2014; Новикова, Жуковская, 2015).

Двигательная активность тараканов интактной и контрольной серий была в целом сходна с описанными ранее изменениями (Zhukovskaya et al., 2017), а именно достоверно уменьшалась во второй сессии при освещении коротковолновым светом (рис. 2). Инъекция двуцепочечной РНК против УФ-чувствительного опсина привела к существенному усилению локомоторной активности при темно-красном освещении. Фоновая темно-красная подсветка слабо возбуждает зеленочувствительные фоторецепторы (Mote, Goldsmith, 1970), но при инактивации коротковолновых фоторецепторов, по-видимому, вклад длинноволновых рецепторов в общий ответ глаза возрастает, приводя к усилению локомоторной активности, характерной для длинноволнового света. Подвижность тараканов при попадании в новую обстановку значительно ослабевает после угасания ориентировочно-исследовательского поведения во второй сессии экспериментов. Уменьшение длительности замираний у тараканов опытной группы при коротковолновом освещении свидетельствует в пользу того, что оно связано с возбуждением УФ-чувствительных фоторецепторов. Увеличение доли коротких замираний и, напротив, сокращение доли долгих за-

мираний по сравнению с контролем (рис. 3, а) говорит об увеличении общей подвижности животных, и, соответственно, неустойчивости и общем уменьшении эффекта маскинга (Mrosovsky, 1999) при освещении в ночной период. Эффект маскинга, наблюдаемый нами ранее (Новикова, Жуковская, 2017; Zhukovskaya et al., 2017), у животных с ночной активностью в виде появления при освещении в темное время суток элементов поведения, характерных для неактивной дневной фазы суточного цикла, проявлялся слабее у тараканов опытной группы, однако не исчезал полностью. Поскольку освещение коротковолновым светом насекомых, лишенных зрительного пигмента, чувствительного в этой области длин волн, должно быть аналогично отсутствию освещения для интактных тараканов, интересно сравнить полученные в настоящей работе данные с ранее описанными. При темно-красной подсветке во второй сессии экспериментов крайне редко наблюдались лишь очень короткие замирания длительностью  $28 \pm 24$  с (Новикова, Жуковская, 2017). Уменьшение экспрессии УФ опсина при коротковолновом освещении приводило к более длительным замираниям на  $165.3 \pm 29.7$  с в опытной серии настоящего исследования. Таким образом, снижение количества коротковолнового опсина в фоторецепторах тараканов не полностью блокировало светозависимое поведение, по-

видимому, вследствие сохранения части зрительного пигмента в глазу (Saari et al., 2018). Слабый физиологический эффект нокдауна зрительного пигмента был также отмечен для длинноволнового (540 нм) фоторецепторного белка медоносной пчелы *Apis mellifera* (Lebouille et al., 2013). Тем не менее у цикадки *Empoasca vitis* экспериментальное подавление зеленочувствительного, но не сине- и ультрафиолет-чувствительного зрительного пигмента методом РНК-интерференции, существенно влияет на поведенческие ответы на цвет кормового растения (Zhang et al., 2018).

Поскольку при РНК-интерференции зрительный пигмент не исчезает полностью, как у генетических мутантов (Yamaguchi et al., 2008), естественно ожидать частичную сохранность поведенческих реакций, возникающих при стимуляции фоторецепторов исследуемого спектрального класса.

## ВЫВОДЫ

Уменьшение уровня УФ-чувствительного пигмента в глазу такого вида ночного насекомого, как американский таракан, приводит к уменьшению выраженности эффекта маскинга при коротковолновом освещении.

Наблюдаемый эффект оказался относительно слабым вследствие неполного нокдауна УФ-чувствительного зрительного пигмента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке госбюджета РФ, программа АААА-А18-118013090245-6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грибакин Ф.Г. *Механизмы фоторецепции насекомых*. Л.: Наука, 1981. 213 с.
- Новикова Е.С., Жуковская М.И. Октопамин, гормон стресса насекомых, изменяет паттерн груминга у таракана *Periplaneta americana*. *Ж. эвол. биохим. и физиол.* 2015. Т. 51. № 2. С. 139–141. <https://doi.org/10.1134/S0022093015020118>
- Новикова Е.С., Жуковская М.И. Реакция замирания под действием яркого света у американского таракана, *Periplaneta americana*. *Сенсорные системы*. 2017. Т. 31. № 1. С. 44–50.
- Bell W.J., Adiyodi K.G. *The American Cockroach*. London. Chapman & Hall, 1982. 538 p.
- Butler R. The identification and mapping of spectral cell types in the retina of *Periplaneta americana*. *Z. Vergl. Physiol.* 1971. V. 72. № 1. P. 67–80. <https://doi.org/10.1007/BF00299204>
- Delcomyn F. Nickel chloride for intracellular staining of neurons in insects. *J. Neurobiol.* 1981. V. 12. № 6. P. 623–627. <https://doi.org/10.1002/neu.480120610>
- French A.S., Meisner S., Liu H., Weckstrom M., Torkkeli P.H. Transcriptome analysis and RNA interference of cockroach phototransduction indicate three opsins and suggest a major role for TRPL channels. *Front. Physiol.* 2015. V. 6. P. 207. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00207>
- Greiner B. Adaptations for nocturnal vision in insect apposition eyes. *Int. Rev. Cytol.* 2006. V. 250. P. 1–46. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(06\)50001-4](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(06)50001-4)
- Heimonen K., Immonen E.V., Frolov R.V., Salmela I., Juusola M., Vähäsöyrinki M., Weckström M. Signal coding in cockroach photoreceptors is tuned to dim environments. *J. Neurophysiol.* 2012. V. 108. P. 2641–2652. <https://doi.org/10.1152/jn.00588.2012>
- Kelly K.M., Mote M.I. Avoidance of monochromatic light by the cockroach *Periplaneta americana*. *J. Insect Physiol.* 1990. V. 36. № 4. P. 287–291. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(90\)90113-T](https://doi.org/10.1016/0022-1910(90)90113-T)
- Laurent Salazar M.O., Deneubourg J.L., Sempo G. Information cascade ruling the fleeing behaviour of a gregarious insect. *Anim. Behav.* 2013. V. 85. № 6. P. 1271–1285. <https://doi.org/10.1002/cne.902690202>
- Laurent Salazar M.O., Planas-Sitjà I., Deneubourg J.L., Sempo G. Collective resilience in a disturbed environment: stability of the activity rhythm and group personality in *Periplaneta americana*. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 2015. V. 69. № 11. P. 1879–1896. <https://doi.org/10.1007/s00265-015-2000-3>
- Lebouille G., Niggebrügge C., Roessler R., Briscoe A.D., Menzel R., de Ibarra N.H. Characterisation of the RNA interference response against the long-wavelength receptor of the honeybee. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 2013. V. 43. № 10. P. 959–969. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2013.07.006>
- Mote M.I., Goldsmith T.H. Spectral sensitivities of color receptors in the compound eye of the cockroach *Periplaneta*. *J. Exp. Zool.* 1970. V. 173. P. 137–145. <https://doi.org/10.1002/jez.1401730203>
- Mrosovsky N. Masking: history, definitions, and measurement. *Chronobiol. Int.* 1999. V. 16. № 4. P. 415–429. <https://doi.org/10.3109/07420529908998717>
- Okada J., Toh Y. Shade response in the escape behavior of the cockroach, *Periplaneta americana*. *Zool. Sci.* 1998. V. 15. № 6. P. 831–835. <https://doi.org/10.2108/zsj.15.831>
- Page T.L. Transplantation of the cockroach circadian pacemaker. *Science*. 1982. V. 216. № 4541. P. 73–75. <https://doi.org/10.1126/science.216.4541.73>
- Penzlin H., Stölzner W. Frontal ganglion and water balance in *Periplaneta americana* L. *Experientia*. 1971. V. 27. № 4. P. 390–391. <https://doi.org/10.1007/BF02137265>
- Saari P., Immonen E.V., French A.S., Torkkeli P.H., Liu H., Heimonen K., Frolov R.V. Electrical interactions between photoreceptors in the compound eye of *Periplaneta americana*. *J. Exp. Biol.* 2018. V. 221. <https://doi.org/10.1242/jeb.189340>
- Song B.M., Lee C.H. Toward a mechanistic understanding of color vision in insects. *Frontiers in neural circuits*. 2018. V. 12. P. 16. <https://doi.org/10.3389/fncir.2018.00016>
- Toh Y., Yokohari F. Postembryonic development of the dorsal ocellus of the American cockroach. *J. Comp.*

- Neurol.* 1988. V. 269. № 2. P. 157–167.  
<https://doi.org/10.1002/cne.902690202>
- Yamaguchi S., Wolf R., Desplan C., Heisenberg M. Motion vision is independent of color in *Drosophila*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2008. V. 105. № 12. P. 4910–4915.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0711484105>
- Zhang X., Pengsakul T., Tukayo M., Yu L., Fang W., Luo D. Host-location behavior of the tea green leafhopper *Empoasca vitis* Göthe (Hemiptera: Cicadellidae): olfactory and visual effects on their orientation. *Bull. Entomol. Res.* 2018. V. 108. № 4. P. 423–433.  
<https://doi.org/10.1017/S0007485317000931>
- Zhukovskaya M.I. Grooming behavior in American cockroach is affected by novelty and odor. *The Scientific World Journal.* 2014. 6 p.  
<https://doi.org/10.1155/2014/329514>
- Zhukovskaya M.I., Novikova E.S., Saari P., Frolov R.V. Behavioral responses to visual overstimulation in the cockroach *Periplaneta americana* L. *J. Comp. Physiol. A.* 2017. V. 203. P. 1007–1015. DOI: 9-017-1210-8  
<https://doi.org/10.1007/s0035>

## Downregulation of cockroach UV-sensitive visual pigment decreases masking effect of short wavelength illumination

E. S. Novikova<sup>a</sup>, I. Yu. Severina<sup>a</sup>, I. L. Isavnina<sup>a</sup>, and M. I. Zhukovskaya<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup> *Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, 194223 St. Petersburg, Toreza 44, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: mzhukovskaya@yahoo.com*

Dual function of light stimulating insect compound eyes is not only to bring the information on the shapes and colors of the surrounding but also on the light levels, regulating the daily and seasonal rhythms of physiological functions. Illumination of the American cockroach with bright light in the night phase of the diel cycle leads to the appearance of the masking effect, the most noticeable manifestation of which were the periods of complete immobility or freezing. Downregulation of the ultraviolet-sensitive visual pigment of a cockroach by RNA interference significantly reduced the masking effect, leading to a reduction in the duration of freezings. The observed changes in behavior were small in magnitude due to incomplete silencing of the UV-sensitive opsin.

*Key words:* visual pigment, RNA interference, behavior, masking, cockroach

### REFERENCES

- Gribakin F.G. *Mechanizmy fotorepcii nacekomych* [Mechanisms of insect photoreception]. L. Nauka, 1981. 213 p. (in Russian).
- Novikova E.S., Zhukovskaya M.I. *Oktopamin, gormon stressa nacekomych, izmenyet pattern gpyminga u tarakana Periplaneta Americana* [Octopamine, the insect stress hormone, alters grooming pattern in the cockroach *Periplaneta Americana*]. *J. Evol. Biochem. Physiol.* 2015. V. 51. P. 160–162. (in Russian).  
<https://doi.org/10.1134/S0022093015020118>
- Novikova E.S., Zhukovskaya M.I. *Reaktsiya zamiraniya pod deistviem yarkogo sveta u amerikanskogo tarakana* [Bright light induced freezing behavior in American cockroach, *Periplaneta americana*] *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2017. V. 31 (1). C. 44–50 (in Russian).
- Bell W.J., Adiyodi K.G. *The American Cockroach*. London. Chapman & Hall, 1982. 538 p.
- Butler R. The identification and mapping of spectral cell types in the retina of *Periplaneta americana*. *Z. Vergl. Physiol.* 1971. V. 72. № 1. P. 67–80.  
<https://doi.org/10.1007/BF00299204>
- Delcomyn F. Nickel chloride for intracellular staining of neurons in insects. *J. Neurobiol.* 1981. V. 12. № 6. P. 623–627.  
<https://doi.org/10.1002/neu.480120610>
- French A.S., Meisner S., Liu H., Weckstrom M., Torkkeli P.H. Transcriptome analysis and RNA interference of cockroach phototransduction indicate three opsins and suggest a major role for TRPL channels. *Front. Physiol.* 2015. V. 6. P. 207.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00207>
- Greiner B. Adaptations for nocturnal vision in insect apposition eyes. *Int. Rev. Cytol.* 2006. V. 250. P. 1–46.  
[https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(06\)50001-4](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(06)50001-4)
- Heimonen K., Immonen E.V., Frolov R.V., Salmela I., Juusola M., Vähäsöyrinki M., Weckström M. Signal coding in cockroach photoreceptors is tuned to dim environments. *J. Neurophysiol.* 2012. V. 108. P. 2641–2652.  
<https://doi.org/10.1152/jn.00588.2012>
- Kelly K.M., Mote M.I. Avoidance of monochromatic light by the cockroach *Periplaneta americana*. *J. Insect Physiol.* 1990. V. 36. № 4. P. 287–291.  
[https://doi.org/10.1016/0022-1910\(90\)90113-T](https://doi.org/10.1016/0022-1910(90)90113-T)
- Laurent Salazar M.O., Deneubourg J.L., Sempo G. Information cascade ruling the fleeing behaviour of a gregarious insect. *Anim. Behav.* 2013. V. 85. № 6. P. 1271–1285.  
<https://doi.org/10.1002/cne.902690202>
- Laurent Salazar M.O., Planas-Sitjà I., Deneubourg J.L., Sempo G. Collective resilience in a disturbed environment: stability of the activity rhythm and group personality in *Periplaneta americana*. *Behav. Ecol. Sociobiol.*

2015. V. 69. № 11. P. 1879–1896.  
<https://doi.org/10.1007/s00265-015-2000-3>
- Lebouille G., Niggebrügge C., Roessler R., Briscoe A.D., Menzel R., de Ibarra N.H. Characterisation of the RNA interference response against the long-wavelength receptor of the honeybee. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 2013. V. 43. № 10. P. 959–969.  
<https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2013.07.006>
- Mote M.I., Goldsmith T.H. Spectral sensitivities of color receptors in the compound eye of the cockroach *Periplaneta*. *J. Exp. Zool.* 1970. V. 173. P. 137–145.  
<https://doi.org/10.1002/jez.1401730203>
- Mrosofsky N. Masking: history, definitions, and measurement. *Chronobiol. Int.* 1999. V. 16. № 4. P. 415–429.  
<https://doi.org/10.3109/07420529908998717>
- Okada J., Toh Y. Shade response in the escape behavior of the cockroach, *Periplaneta americana*. *Zool. Sci.* 1998. V. 15. № 6. P. 831–835.  
<https://doi.org/10.2108/zsj.15.831>
- Page T.L. Transplantation of the cockroach circadian pacemaker. *Science*. 1982. V. 216. № 4541. P. 73–75.  
<https://doi.org/10.1126/science.216.4541.73>
- Penzlin H., Stölzner W. Frontal ganglion and water balance in *Periplaneta americana* L. *Experientia*. 1971. V. 27. № 4. P. 390–391.  
<https://doi.org/10.1007/BF02137265>
- Saari P., Immonen E.V., French A.S., Torkkeli P.H., Liu H., Heimonen K., Frolov, R.V. Electrical interactions between photoreceptors in the compound eye of *Periplaneta americana*. *J. Exp. Biol.* 2018. 221: jeb189340.  
<https://doi.org/10.1242/jeb.189340>
- Song B.M., Lee C.H. Toward a mechanistic understanding of color vision in insects. *Frontiers in neural circuits*. 2018. V. 12. P. 16.  
<https://doi.org/10.3389/fncir.2018.00016>
- Toh Y., Yokohari F. Postembryonic development of the dorsal ocellus of the American cockroach. *J. Comp. Neurol.* 1988. V. 269. № 2. P. 157–167.  
<https://doi.org/10.1002/cne.902690202>
- Yamaguchi S., Wolf R., Desplan C., Heisenberg M. Motion vision is independent of color in *Drosophila*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2008. V. 105. № 12. P. 4910–4915.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0711484105>
- Zhang X., Pengsakul T., Tukayo M., Yu L., Fang W., Luo D. Host-location behavior of the tea green leafhopper *Empoasca vitis* Göthe (Hemiptera: Cicadellidae): olfactory and visual effects on their orientation. *Bull. Entomol. Res.* 2018. V. 108. № 4. P. 423–433.  
<https://doi.org/10.1017/S0007485317000931>
- Zhukovskaya M.I. Grooming behavior in American cockroach is affected by novelty and odor. *The Scientific World Journal*. 2014. Article ID 329514, 6 pages,  
<https://doi.org/10.1155/2014/329514>
- Zhukovskaya M.I., Novikova E.S., Saari P., Frolov R.V. Behavioral responses to visual overstimulation in the cockroach *Periplaneta americana* L. *J. Comp. Physiol. A*. 2017. V. 203. P. 1007–1015.  
<https://doi.org/10.1007/s00359-017-1210-8>

УДК 004.5

## ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИДЕООКУЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭРГАТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

© 2021 г. Я. А. Туровский<sup>1,2,\*</sup>, А. В. Алексеев<sup>1</sup>, И. Е. Лесных<sup>1</sup>, Е. В. Мартыненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет, 394018 Воронеж, Университетская площадь, д. 1, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, Россия

\*E-mail: yaroslav\_turovsk@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.2020 г.

После доработки 25.05.2020 г.

Принята к публикации 15.07.2020 г.

Работа посвящена развитию представления о возможностях видеоокулографических интерфейсов в задачах управления. Представлены результаты исследования параметров движения глаз человека при помощи видеоокулографического интерфейса для управления объектом на плоскости. Показано, что в ходе проводимого эксперимента от попытки к попытке снижалось количество ошибок и число испытуемых, не осуществивших успешное управление, а также зависимость способности такого управления от темперамента человека и особенностей рабочей памяти. При высоких значениях рабочей памяти пользователи совершают, формируя управляющий паттерн, более резкие высокоамплитудные движения зрачком с периодом до 1.6 с, что в итоге приводит к большему числу ошибок управления и не достижению требуемого результата. В значительной степени полученные результаты связаны с горизонтальными, а не с вертикальными движениями глаз. Представленные результаты будут полезными для создания и применения интерфейсов человек-компьютер в цифровом мониторинге при управлении эргатическими системами и могут служить отправной точкой для разработки высокоскоростных окулографических интерфейсов с существенно более широким, по сравнению с существующим, функционалом.

*Ключевые слова:* окулографический интерфейс, эргатические системы, цифровой мониторинг, интерфейс человек-компьютер

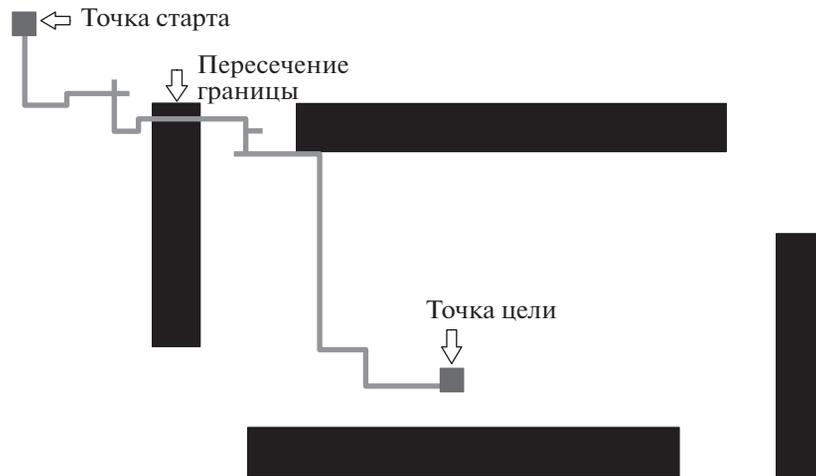
**DOI:** 10.31857/S0235009221010091

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в рамках решения широкого спектра задач активно разрабатывается большая группа интерфейсов для управления эргатическими (человеко-машинными) системами (Wolpaw, 2002; Martin, 2011; Zhu, 2010; Microsoft, 2009; Tobii, 2010). При этом принципы управления допускают использование, наряду с широко распространенными в качестве команд сигналы, зарегистрированные с мозга, движения глаз, мышц. Данные команды могут обеспечивать управление системами, реализующими как замещение утраченных пользователем функций, так и дополняющих и расширяющих набор этих функций у здорового оператора. Одной из таких эргатических систем, характеризующихся высокой скоростью и точностью работы, по сравнению с интерфейсом мозг-компьютер, является видеоокулографический интерфейс: близкое технологическое решение с так называемой eye-tracing реализацией (Ouekoуа, 2004; Bissoli, 2019). Прин-

цип работы данного устройства заключается в том, что видеоизображение, зафиксированное с глазного яблока, после обработки, связанной, как правило, с выделением зрачка и анализом траектории его движения, превращается в команды на устройства—эффекторы, например, персональный компьютер или самоходное шасси. Исследования продемонстрировали в целом успешность данной категории устройств: высокий процент пользователей (Туровский, 2017б), овладевающих техникой управления, низким влиянием на вегетативный гомеостаз (Туровский, 2018), связь с рядом мутаций (Туровский, 2019) и, в целом, достаточно удачную эргономику. Однако остается ряд вопросов, связанных с психологическими коррелятами овладения устройствами и стратегиями управления, в первую очередь изменения движений глаз, которые используют операторы для достижения целей.

Цель настоящего исследования — анализ связи ряда психофизиологических показателей опера-



**Рис. 1.** Пример траектории движения пользователя от точки старта к точке финиша с ошибкой в виде попадания в области черных прямоугольников.

торской деятельности с частотно-временными характеристиками движения глаз при использовании видеоокулографического интерфейса.

### МЕТОДИКА

Методология эксперимента основывается на ранних работах (Туровский, 2017б). Разработанная авторами компьютерная программа имитирует управление перемещением объекта на плоскости, тем самым программа обеспечивает обучение и тестирование освоения пользователем видеоокулографического интерфейса. Переход от управления самоходным шасси к управлению объектом на плоскости связан с необходимостью минимизировать изменение положения головы оператора, не используя в то же время ее фиксации. Реализована интеграция аппаратной части видеоокулографического интерфейса с компьютером, настройка параметров видеорегистрации движения зрачка, калибровка движения глаз пользователя и, в дальнейшем, прохождение пользователем серии задач, сформированных экспериментатором. Испытуемому следует движениями глаз перемещать маркер по полю из одной области в другую, обходя препятствия, положение которых может изменять экспериментатор. Фиксируются координаты положения глаз, маркера, попадание маркера в целевые области и на препятствия.

В проведенных экспериментах приняли участие 40 добровольцев: 22 юноши и 18 девушек в возрасте от 19 до 23 лет, их медианный возраст составил 20 лет. Испытуемые не имели неврологической и психиатрической патологии, не принимали лекарств, влияющих на координацию движений и скорость принятия решения, имели нормальное или скорректированное до нормаль-

ного зрение. Испытуемые находились перед экраном монитора (22”) на комфортном для себя расстоянии. Видеоокулографический интерфейс позволял на основе стандартной видеокамеры с извлеченным инфракрасным (ИК) фильтром получить более четкое по сравнению с камерой с оставленным ИК фильтром изображение области глаза. Для ИК камеры был изготовлен специальный держатель, который крепится на голове и предоставляет возможность изменения положения камеры, что позволяет осуществлять настройку изображения, поступающего с камеры независимо от формы головы, и удовлетворять требованиям удобства испытуемого. После проведения калибровки на экране монитора запускалось экспериментальное поле, представляющее собой область старта, прямоугольные границы ряда объектов и область цели. В инструкции, которая в устной и письменной форме излагалась испытуемому, запрещалось совмещать маркер с объектами, обозначенными черными прямоугольниками на экране. Совмещение маркера с таким объектом расценивалось как ошибка управления/промах, которая автоматически фиксировалась программой (рис. 1). Программа фиксировала и распознавала движение зрачка глаза в четырех направлениях: “вверх”, “вниз”, “влево”, “вправо”. Каждому испытуемому было предоставлено четыре попытки для прохождения эксперимента, длительностью 2 мин. Каждая новая команда могла генерироваться пользователем не чаще 1 раза в секунду, при регистрации положения зрачка 25 раз в секунду. Перед каждым экспериментом проводилась необходимая калибровка устройства.

С использованием тестов Айзенка, Спилберга и теста на рабочую память были установлены психологические характеристики испытуемых.

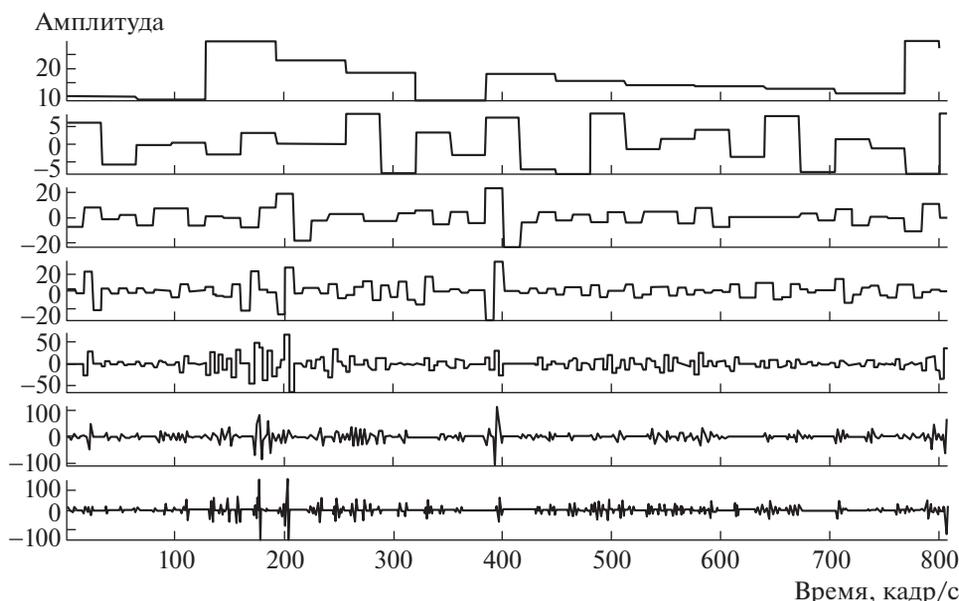


Рис. 2. Результаты вейвлет-преобразования расстояния перемещения зрачка. Пояснения в тексте.

Тест на рабочую память реализован следующим образом: задавалась матрица размером  $5 \times 5$  квадратов. В каждой попытке генерировалось выделение трех квадратов, последовательность которых нужно было запомнить и верно определить порядковый номер предъявления одного из них в конце каждой попытки (Войтов и др., 2015). Число попыток равнялось десяти.

Для оценки параметров движения глаз использовался с учетом особенностей генерации команд алгоритм дискретного вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Хаара (Добеши, 2001). Для полученных значений каждого уровня вейвлет-преобразования (рис. 2) рассчитывались средние значения и среднеквадратическое отклонение всего временного ряда. Полученные значения интерпретируются как средние расстояния, пройденные зрачком за время эксперимента, при этом период изменения расстояния соответствует масштабу (или уровню) вейвлет-преобразования. Соответственно, среднеквадратическое отклонение данных временного ряда после вейвлет-преобразования — это усредненные значения перемещений зрачка от средней амплитуды перемещения за все время выполнения теста. Полученные значения будем называть, в соответствии с принятыми в вейвлет-анализе подходами, аппроксимирующими последовательностями (*a*-последовательности) и детализирующими последовательностями (*b*-последовательности). При этом непосредственно вейвлет-преобразование осуществлялось на данных, где частота дискретизации была искусственно снижена до 5 Гц. Таким образом, масштабы вейвлет-

преобразования имели следующие периоды: 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8 с.

В статистическом анализе использовались методы дескриптивной статистики, критерии Краскела—Уоллиса, Манна—Уитни, Вилкоксона для парных случаев (Рунион, 1982; Гланц, 1998), при этом параметр  $\alpha$  принимался равным 5%. Для анализа категориальных переменных использовались точный критерий Фишера и критерий  $\chi^2$ . Для статистического изучения связи между явлениями использовали непараметрический метод — коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Учитывался эффект множественных сравнений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Число испытуемых, не достигших цели в первой, второй, третьей и четвертой попытках, составило 70, 50, 47.5 и 45% соответственно ( $p < 0.05$  при сравнении первого и последнего эксперимента). Этот факт демонстрирует эффективность обучения применению данного интерфейса для управления эргатической системой и, в общем, близок к результатам, полученным при управлении движущимися объектами (Туровский, 2017а). Число тех, кто дошел до цели, но не начал возвращаться к точке старта в первой, второй, третьей и четвертой попытках, составило 5, 7.5, 10 и 10% соответственно ( $p \gg 0.05$ ). Очевидным результатом было то, что пользователь, совершивший меньшее число ошибок при управлении маркером (совмещение маркера с областями экрана, запрещенными для совмещения на данном эксперименте), большее число раз достигал целевой области ( $p < 0.05$ ). Корреляционным анализом выяв-

**Таблица 1.** Значения расстояния перемещения зрачка (у. е.) для разных масштабов вейвлет-преобразования в зависимости от достижения цели. Среднее  $M \pm m$  (СКО  $M \pm m$ )

Масштаб ВП	Уровни											
	<i>a</i> -последовательность						<i>b</i> -последовательность					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Не дошел до цели	3.67 ± 0.37 (14.08 ± 0.41)	3.63 ± 0.37 (9.60 ± 0.35)	3.59 ± 0.37 (6.40 ± 0.30)	3.56 ± 0.37 (4.35 ± 0.25)	3.53 ± 0.37 (3.04 ± 0.21)	3.52 ± 0.37 (2.19 ± 0.17)	-0.08 ± 0.06 (14.09 ± 0.38)	-0.10 ± 0.06 (9.91 ± 0.26)	0.04 ± 0.06 (6.78 ± 0.21)	-0.03 ± 0.06 (4.48 ± 0.18)	-0.02 ± 0.05 (2.98 ± 0.16)	0.04 ± 0.07 (2.00 ± 0.13)
Дошел до цели	2.74 ± 0.27** (11.91 ± 0.33**)	2.68 ± 0.27** (8.04 ± 0.29**)	2.65 ± 0.27** (5.44 ± 0.24**)	2.63 ± 0.27** (3.75 ± 0.20*)	2.61 ± 0.27** (2.58 ± 0.16**)	2.59 ± 0.27** (1.86 ± 0.13*)	-0.05 ± 0.05 (12.14 ± 0.29*)	0.01 ± 0.04 (8.27 ± 0.20**)	-0.08 ± 0.04 (5.68 ± 0.18*)	-0.06 ± 0.05 (3.82 ± 0.15*)	-0.08 ± 0.05 (2.61 ± 0.12*)	0.01 ± 0.05 (1.73 ± 0.10*)

Примечание: \*\*\* –  $p < 0.001$ , \*\* –  $p < 0.01$ , \* –  $p < 0.05$  при различиях между достижением и не достижением цели.

лена взаимосвязь между результатами теста на экстраверсию (тест Айзенка) и результатами успешного выполнения испытания ( $p < 0.05$ ,  $r = -0.39$ ), что свидетельствует о том, что экстраверты хуже достигают цели, вероятно, это обусловлено большей концентрацией внимания интровертов.

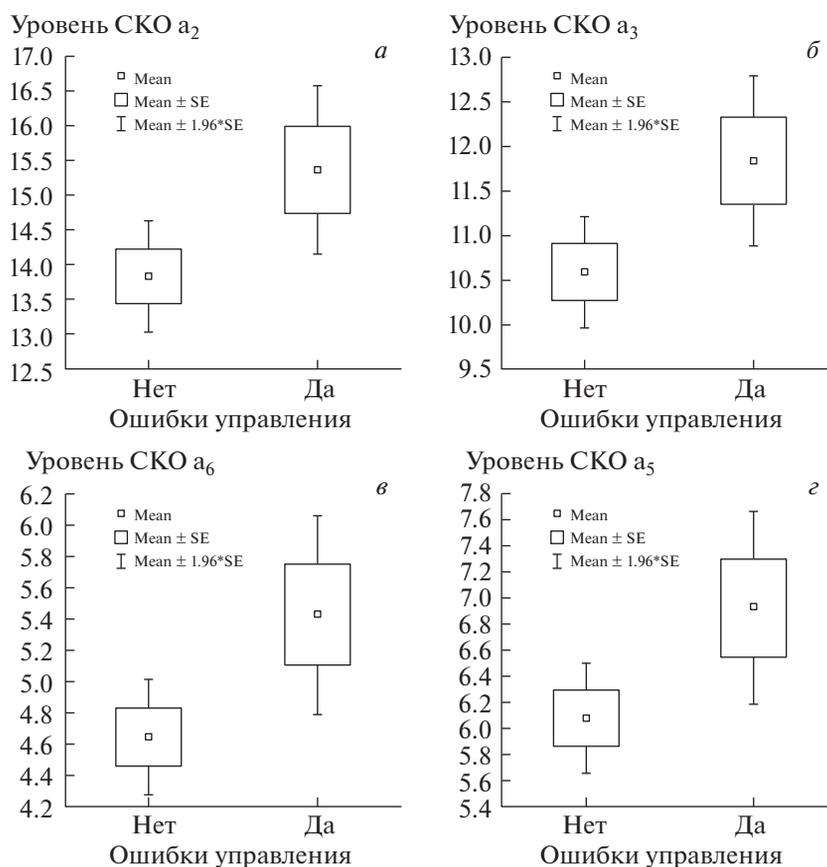
Разделение выборки по результатам достижения или недостижения цели продемонстрировало следующую зависимость (табл. 1). При достижении цели среднеквадратическое отклонение как *a*-последовательностей, так и *b*-последовательностей были статистически ниже, чем для попыток, где цель не была достигнута. Аналогично средние значения *a*-последовательностей (аппроксимированных файлов) так же были ниже при достижении цели. Следовательно, зрачок пользователя проходил меньшие расстояния, а сам характер движений носил меньший размах при успешном достижении цели.

При этом следует обратить внимание, что данная закономерность охватывала все исследуемые периоды. Данный результат может быть интерпретирован двояко. С одной стороны (Туровский, 2017б), по мере успешного овладения методикой управления размах движений зрачка уменьшается. С другой, возможна ситуация, что пользователь активно двигает глазом, пытаясь “найти” те положения, которые соответствуют успешному управлению, что, однако, по ряду причин не удается. В этом случае стратегия максимальной амплитуды движения глаз сохраняется, что и находит отражение в представленных данных.

Сравнение результатов вейвлет-преобразования в зависимости от ошибок управления показало, что для периодов 0.8, 1.6, 6.4 и 12.8 с наличие ошибок управления сопровождается значимо большими значениями среднеквадратического

отклонения *a*-последовательностей (рис. 3). При этом для *b*-последовательностей таких зависимостей в большинстве случаев не наблюдалось. Таким образом, выявленное увеличение среднеквадратического отклонения отражает больший размах движений зрачка. Вероятно, большая амплитуда движений зрачка соответствует худшему управлению, что приводит к ошибке, и в то же время больший размах движений может отражать попытки пользователя выйти из зоны экрана, нахождение в которой интерпретируется как ошибка. Таким образом, показано, что высокоамплитудные движения глаз в исследуемых периодах являются маркерами неуспешного овладения видеоокулографическим интерфейсом и являются показателями наличия ошибок при его использовании. В то же время динамика результатов вейвлет-преобразования от попытки к попытке выявлена не была.

Анализ параметров рабочей памяти с успешностью или неуспешностью достижения цели продемонстрировал взаимосвязь этих показателей (рис. 4). Можно было бы ожидать, что более высокие показатели рабочей памяти должны давать лучшие результаты управления. Действительно, в ходе работы с окулографическим интерфейсом пользователю нужно запоминать необходимые положения зрачка, генерирующие команды, и соотносить их с управлением курсором. Вероятно, низкий уровень рабочей памяти не позволяет пользователю запоминать необходимые для управления параметры, что должно сказаться на результате. Сравнение показателей рабочей памяти с ошибками в управлении показало значимые различия. Люди с низким значением теста на рабочую память (6–7 баллов) реже совершали ошибку управления (в двух случаях из 20). Люди с высоким значением теста на рабочую память (9–10 баллов) совершали ошибки управле-

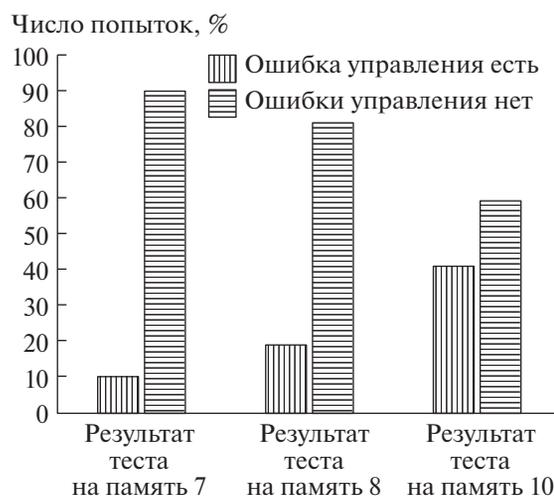


**Рис. 3.** Различия среднеквадратического отклонения для аппроксимирующих значений ( $a$  – последовательность) в зависимости от наличия ошибок в управлении. Различия статистически значимы для:  $a - p = 0.0466$ ;  $б - p = 0.0368$ ;  $в - p = 0.0090$ ;  $г - p = 0.0232$ .

ния значительно чаще, в 43 случаях из 105. Таким образом, высокие показатели рабочей памяти связаны с низкими показателями освоения окулографического интерфейса, т.е. результаты продемонстрировали противоположную динамику: с ростом результатов тестирования по рабочей памяти (что подразумевает лучшие показатели) качество управления снижается.

Последовательности, представляющие собой результаты вейвлет-преобразования, продемонстрировавшие статистически значимые различия в зависимости от показателей рабочей памяти, представлены в табл. 2. Из таблицы следует, что высокие значения рабочей памяти оператора приводят к высоким значениям среднеквадратического отклонения расстояний, на которые перемещался зрачок. Поскольку установлено, что высокоамплитудные движения глаз являются маркерами неуспешного овладения окулографическим интерфейсом, то становится понятной связь большого числа ошибок и низкой точности работы окулографического интерфейса для операторов с высокими показателями рабочей памяти. Тем не менее физиологический механизм

этой зависимости требует еще детального изучения. Можно предположить, что именно тот тест на рабочую память из большого числа существующих



**Рис. 4.** Доля достигнувших цели в зависимости от показателей рабочей памяти ( $p < 0.01$ ).

**Таблица 2.** Различия *b*-последовательностей в зависимости от характеристик рабочей памяти

Значения памяти	Уровни ВП									
	<i>b1</i>		<i>b2</i>		<i>b3</i>		<i>b4</i>		<i>b5</i>	
	М*	СКО**	М	СКО*	М	СКО***	М	СКО**	М	СКО**
Средние (8)	-0.09 ± 0.11	11.62 ± 0.63	0.11 ± 0.12	9.63 ± 0.55	-0.10 ± 0.17	7.31 ± 0.45	0.16 ± 0.17	6.01 ± 0.35	-0.33 ± 0.21	4.33 ± 0.24
Низкие (6,7)	-0.01 ± 0.10	11.60 ± 0.56	-0.24 ± 0.16	10.57 ± 0.80	0.06 ± 0.15	7.81 ± 0.61	0.06 ± 0.20	6.66 ± 0.54	-0.10 ± 0.29	4.87 ± 0.44
Высокие (9,10)	-0.19 ± 0.06	13.63 ± 0.37	0.03 ± 0.08	11.74 ± 0.35	0.005 ± 0.11	9.68 ± 0.30	-0.06 ± 0.14	7.32 ± 0.21	-0.04 ± 0.11	5.78 ± 0.19

Примечание: критерий Краскела–Уоллиса (\*\*\*) –  $p \ll 0.001$ , \*\* –  $p < 0.01$ , \* –  $p < 0.05$ ). М – среднее значение ряда, СКО – среднеквадратическое отклонение ряда.

**Таблица 3.** Проекция движения зрачка на ортогональные оси

Горизонталь		Вертикаль	
Среднее <i>b1</i>	-0.03 ± 0.09	Среднее <i>b1</i>	-0.02 ± 0.05
СКО <i>b1</i>	16.46 ± 0.46	СКО <i>b1</i>	10.06 ± 0.33***
Среднее <i>b2</i>	-0.07 ± 0.07	Среднее <i>b2</i>	-0.08 ± 0.05
СКО <i>b2</i>	9.84 ± 0.25	СКО <i>b2</i>	6.36 ± 0.19***
Среднее <i>b3</i>	-0.04 ± 0.07	Среднее <i>b3</i>	-0.02 ± 0.05
СКО <i>b3</i>	5.94 ± 0.15	СКО <i>b3</i>	3.88 ± 0.11***
Среднее <i>b4</i>	-0.08 ± 0.05	Среднее <i>b4</i>	-0.05 ± 0.04
СКО <i>b4</i>	3.29 ± 0.09	СКО <i>b4</i>	2.23 ± 0.07***
Среднее <i>b5</i>	-0.07 ± 0.04	Среднее <i>b5</i>	0.03 ± 0.03*
СКО <i>b5</i>	1.78 ± 0.05	СКО <i>b5</i>	1.25 ± 0.04***
Среднее <i>a6</i>	-0.05 ± 0.01	Среднее <i>a6</i>	-0.01 ± 0.01***
СКО <i>a6</i>	0.66 ± 0.02	СКО <i>a6</i>	0.54 ± 0.02***
Среднее <i>b6</i>	-0.02 ± 0.03	Среднее <i>b6</i>	0.02 ± 0.02
СКО <i>b6</i>	0.92 ± 0.03	СКО <i>b6</i>	0.71 ± 0.02

Примечание: критерий Краскела–Уоллиса (\*\*\*) –  $p \ll 0.001$ , \*\* –  $p < 0.01$ , \* –  $p < 0.05$ ).

ющих, который использовался в этой работе, обеспечивает столь парадоксальный результат.

Рассматривая не суммарное перемещение зрачка, а отдельно перемещения в проекциях на горизонтальные и вертикальные оси, получены следующие результаты (табл. 3). Для всех исследуемых периодов размах движений зрачка по горизонтальной оси существенно превосходил таковой для вертикальной оси. При этом различия в зависимости от достижения цели в детализированных последовательностях для периодов меньше 3.2 были достоверно значимы для горизонтального движения глаз, но отсутствовали для движения глаз по вертикали. Связи между характером движения зрачка в проекции на вертикальную и горизонтальную оси в зависимости от ошибок при выполнении команд установлено не было.

Анализ влияния показателей рабочей памяти продемонстрировал, что только быстрые движения глаз в горизонтальной плоскости (0.4, 0.8 с) давали статистически значимые различия ( $p < 0.01$ ), в то время как вертикальные движения глаз не продемонстрировали достоверных различий.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования параметров движения глаз человека при помощи видеоокулографического интерфейса для управления объектом на плоскости. Показано, что в ходе проводимого эксперимента от попытки к попытке снижались количество ошибок и число испытуемых, не осуществивших успешное управление, а также зависимость способности такого управления от темперамента человека и особенностей рабочей памяти. Показано, что при высо-

ких значениях рабочей памяти пользователи совершают более резкие высокоамплитудные движения зрачком, формируя управляющий паттерн, что в итоге приводит к большему числу ошибок управления и не достижению требуемого результата. Таким образом, данные о психологических особенностях пользователя позволяют, в первом приближении, оценить его потенциал в аспекте освоения видеоокулографических интерфейсов. В значительной степени различия по указанным показателям связаны с движением зрачка вдоль горизонтальной оси, нежели в вертикальной. Наиболее значимые движения зрачка находятся в областях с периодом от 0.4 до 1.6 с. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации расположения датчиков движения глаза и выборе оптимальной частоты дискретизации данных, что позволит снизить объем вычислений без существенной потери точности. Более медленные периодические компоненты в движении глаз мало связаны с особенностями управления окулографическим интерфейсом. Полученные результаты будут полезными для создания и применения интерфейсов человек-компьютер в цифровом мониторинге при управлении эргатическими системами и могут служить отправной точкой для разработки высокоскоростных окулографических интерфейсов с существенно более широким, по сравнению с существующим, функционалом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-07-01037 А).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Войтов В.К., Косихин В.В., Ушаков Д.В. Рабочая память как перспективный конструктор когнитивной психологии и методы его измерения. *Моделирование и анализ данных*. 2015. С. 57–78.
- Гланц С. *Медико-биологическая статистика*. М.: Практика, 1998. 459 с.
- Добеши И. *Десять лекций по вейвлетам*. М.: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. 464 с.
- Рунион Р. *Справочник по непараметрической статистике*. Современный подход. М.: Финансы и статистика, 1982. 198 с.
- Туровский Я.А., Алексеев А.В. Вариабельность сердечного ритма пользователей видеоокулографическим интерфейсом в процессе обучения управлением самоходным шасси. *Вестник ВГУ*. 2017а. № 1. С. 118–124.
- Туровский Я.А., Борзунов С.В., Вахтин А.А., Алексеев А.В., Мамаев А.В. Вариабельность сердечного ритма в ходе обучения пользователей применению интерфейсов человек-компьютер. *Вестник ВГУ*. 2018. № 2. С. 255–263.
- Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Алексеев А.В. Анализ движения глаз человека при управлении самоходным шасси с использованием системы видеоокулографического интерфейса. *Сенсорные системы*. 2017б. Т. 31. № 1. С. 51–58.
- Bissoli A., Lavino-Junior D., Sime M., Encarnação L., Bastos-Filho T. A human-machine interface based on eye tracking for controlling and monitoring a smart home using the internet of things. *Sensors*. 2019. 859 p. <https://doi.org/10.3390/s19040859>
- Martin W.C. *Upper Limb Prosthesis: A review of the literature with a focus on myoelectric hands workSafeBC. Evidence-Based Practice Group*. 2011. 90 p.
- Maikrocoft. <http://www.microsoft.com/en-us/kinectfor-windows> 2009.
- Oyekoya O.K., Stentiford F.W.M. Eye tracking as a new interface for image retrieval. *BT Technology Journal*. 2004. P. 161–169. <https://doi.org/10.1023/B:BTJJ.0000047130.98920.2b>
- Tobii. <http://www.tobii.com/en/eye-tracking-research/global/products/> 2010.
- Wolpaw J.R., Birbaumer N., McFarland D.J. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*. 2002. V. 113. P. 767–791.
- Zhu D., Bieger J., Molina G. *A Survey of Stimulation Methods Used in SSVEP-Based BCIs*. Hindawi publishing corporation computational intelligence and neuroscience. 2010. Article ID 702357.

## Frequency-time features of eye movement when using the video-oculographic interface in ergatic system control problems

Y. A. Turovskii<sup>a,b,#</sup>, A. V. Alekseev<sup>a</sup>, I. E. Lesnykh<sup>a</sup>, and E. V. Martynenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Voronezh State University, 394018 Voronezh, Universitetskaya square, 1, Russia

<sup>b</sup> V.A. Institute of Management Problems Trapeznikova RAS, 179971 Moscow, trade Union street 65, Russia

<sup>#</sup>E-mail: yaroslav\_turovsk@mail.ru

The paper is devoted to the development of the concept of the capabilities of video-oculographic interfaces in management tasks. The results of studying the parameters of human eye movement using a video-oculographic interface for controlling an object on a plane are presented. It is shown that in the course of the experiment, the number of errors and the number of subjects who did not perform successful control decreased from attempt to attempt, as well as the dependence of the ability of such control on the human temperament and working memory features. At high values of working memory, users make more sharp high-amplitude movements of the pupil with a period of up to 1.6 s, forming a control pattern, which eventually leads to more control errors and does not achieve the desired result. To a large extent, the results obtained are related to hor-

izontal rather than vertical eye movements. The presented results will be useful for creating and applying human-computer interfaces in digital monitoring in the management of ergatic systems and can serve as a starting point for the development of high-speed oculographic interfaces with significantly broader functionality than the existing ones.

*Keywords:* oculographic interface, ergatic systems, digital monitoring, human-computer interface

REFERENCES

- Vojtov V.K., Kosihin V.V., Ushakov D.V. Rabochaya pamyat' kak perspektivnyj konstrukt kognitivnoj psihologii i metody ego izmereniya [Working memory as a perspective construct of cognitive psychology and methods of its measurement]. *Modelirovanie i analiz dannyh [Data modeling and analysis]*. 2015. P. 57–78 (in Russian).
- Glanc S. Mediko-biologicheskaya statistika [*Biomedical statistics*]. Moscow. Praktika, 1998. 459 p. (in Russian).
- Dobeshi I. Desyat' lekcij po vejvletam [Ten lectures on wavelets]. Moscow. NIC "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika" [*SIC "Regular and chaotic dynamic"*], 2001. 464 p. (in Russian).
- Runion R. Spravochnik po neparametricheskoj statistike [Handbook of nonparametric statistics]. *Sovremennyy podhod [Modern approach]*. Moscow. Finansy i statistika [*Finance and statistics*]. 1982. 198 p. (in Russian).
- Turovskij Ya.A., Alekseev A.V. Variabel'nost' serdechnogo ritma pol'zovatelej videookulograficheskim interfejsom v processe obucheniya upravleniem samohodnym shassi [Heart rate variability of users of the video-oculographic interface in the process of learning how to operate a self-propelled chassis]. *Vestnik VGU [Bulletin of VSU]*. 2017a. № 1. P. 118–124 (in Russian).
- Turovskij Ya.A., Borzunov S.V., Vahtin A.A., Alekseev A.V., Mamaev A.V. Variabel'nost' serdechnogo ritma v hode obucheniya pol'zovatelej primeneniyu interfeisov chelovek-komp'yuter [Heart rate variability in the course of training users to use human-computer interfaces]. *Vestnik VGU [Bulletin of VSU]*. 2018. № 2. P. 255–263 (in Russian).
- Turovskij Ya.A., Kurgalin S.D., Alekseev A.V. Analiz dvizheniya glaz cheloveka pri upravlenii samohodnym shassi s ispol'zovaniem sistemy videookulograficheskogo interfeisa [Analysis of human eye movements in the management of self-propelled chassis with video eye-tracking interface system]. *Sensornye sistemy [Sensory systems]*. 2017b. T. 31. № 1. P. 51–58 (in Russian).
- Bissoli A., Lavino-Junior D., Sime M., Encarnação L., Bastos-Filho T. A human-machine interface based on eye tracking for controlling and monitoring a smart home using the internet of things. *Sensors*. 2019. 859 p. <https://doi.org/10.3390/s19040859>
- Martin W.C. *Upper Limb Prostheses: A review of the literature with a focus on myoelectric hands workSafeBC*. Evidence-Based Practice Group. 2011. 90 p. Microsoft <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/2009>.
- Oyekoya O.K., Stentiford F.W.M. Eye tracking as a new interface for image retrieval. *BT Technology Journal*. 2004. P. 161–169. <https://doi.org/10.1023/B:BTTJ.0000047130.98920.2b> Tobii. <http://www.tobii.com/en/eye-tracking-research/global/products/2010>.
- Turovsky Ya.A., Gureev A.P., Vitkalova I.YU., Popov V.N. Connection between polymorphisms in HTR2A, TPH2, BDNF, TOMM40 genes and the successful mastering of human-computer interfaces *Journal of genetics*. 2019. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12041-019-1138-6>
- Wolpaw J.R., Birbaumer N., McFarland D.J. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*. 2002. V. 113. P. 767–791.
- Zhu D., Bieger J., Molina G. *A Survey of Stimulation Methods Used in SSVEP-Based BCIs*. Hindawi publishing corporation computational intelligence and neuroscience. 2010. Article ID 702357.

УДК 495.754.1:591.582

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ О ВИБРАЦИОННОЙ КОММУНИКАЦИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ БЕЗОПАСНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕКОМЫХ

© 2021 г. Л. С. Шестаков<sup>1,2</sup>, А. Эль Хашаш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 127051 Москва, Большой каретный пер., 19, Россия

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 8, Россия

\*E-mail: zicrona@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.09.2020 г.

После доработки 02.11.2020 г.

Принята к публикации 06.11.2020 г.

Накопленные данные о вибрационной коммуникации насекомых показывают, что использование естественных и модифицированных сигналов вредителей может препятствовать их успешной коммуникации на растении, тем самым снижая их численность. В данной работе мы обсуждаем эффективность применения стимулов на примере широко распространенного и повреждающего большой спектр растений вида *Pentatoma rufipes* (L.).

**Ключевые слова:** вибрационная коммуникация, защита растений, органическое земледелие

**DOI:** 10.31857/S023500922101008X

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время традиционные методы мониторинга и контроля численности вредителей теряют свою эффективность. Так, к инсектицидам насекомые вырабатывают устойчивость и их приходится применять в более высоких концентрациях, что сказывается на качестве и безопасности продукции. Существует мнение, что продукция, произведенная с применением большого количества пестицидов, может служить одной из причин возросшего количества онкологических заболеваний и аллергических реакций.

В связи с этим во многих странах Европейского Союза, Азии, в США нарастает тенденция перехода к органическому земледелию и новым методам мониторинга и контроля численности вредителей. Одним из таких методов является использование вибрационной коммуникации насекомых для их обнаружения или управления поведением (de Groot et al., 2010, Avosani et al., 2020).

В связи с перемещением между странами больших партий сельскохозяйственной продукции, семенного и посадочного материала, возросшим числом транспортных перевозок, которые могут служить путем проникновения опасных карантинных вредителей (таких как гватемальская картофельная моль, коричнево-мраморный клоп, и другие карантинные виды), существующие методы досмотра и диагностики не всегда являются доста-

точными. В случаях с посадочным материалом, необработанной древесиной и многими другими факторами, вредители могут быть скрыты в твердых субстратах и их визуальное обнаружение невозможно. Для таких субстратов могут быть эффективны акустические методы мониторинга. При этом всегда есть опасность, что инвазивные виды могут “обрушить” всю местную экосистему и нанести непредсказуемый экономический ущерб. Так, проникший на юг Италии опасный инвазивный вредитель *Nalyomorpha halys* (Stål), повреждающий широкий спектр растительных культур, уже в 2017–2018 гг. был обнаружен на севере страны (Malek et al., 2019).

При этом многие виды, обычные для средней полосы России, в странах Европы являются вредителями, которые могут наносить серьезный ущерб (Panizzi et al., 2000). Так, широко распространенный в России клоп *Pentatoma rufipes* (L.) в северной Европе может значительно вредить фруктовым насаждениям (Powell, 2020). Развитие сельского хозяйства в новых перспективных регионах могут препятствовать в том числе и высокие риски перехода таких видов с дикорастущих растений на новые сельскохозяйственные сорта.

Этот комплекс причин определяет необходимость поиска и развития новых методов контроля численности вредителей (Panizzi et al., 2000). Аку-

стический метод контроля по степени воздействия на окружающую среду является наиболее безопасным. Более того, появляется все больше данных о его перспективности и способности повышать эффективность таких традиционных методов, как клеевые и феромонные ловушки (Suckling et al., 2019).

В предыдущем исследовании на *Pentatoma rufipes* (L.) мы показали, что дизруптивные сигналы самок, воспроизводимые на кормовое растение, могут быть эффективным стимулом, препятствующим копуляции (Шестаков, 2020). В данной работе мы проверили эффективность других типов сигналов, как привлекающих стимулов.

## МЕТОДИКА

### *Регистрация и анализ сигналов*

Для регистрации сигналов применяли лазерный виброметр PDV 100 (Polytec, Germany). Портативный лазерный виброметр PDV 100 разработан, в частности, для регистрации вибраций живых объектов. Он имеет следующие преимущества по сравнению с контактными датчиками: позволяет минимизировать влияние исследователя на объект, возможность получения высокого соотношения сигнал/шум (высокая помехозащищенность); позволяет измерять механические колебания сложной формы на значительных расстояниях от объекта измерения; минимизация влияния параметров внешней среды на параметры сигнала в отличие от пьезоэлектрических датчиков; компактность, автономность и малый вес для работы в полевых условиях, возможность работы с программным обеспечением стороннего производителя для обработки сигналов.

Пьезокристаллический адаптер ГЗК-661 идеален в условиях, когда использование лазерного виброметра затруднено, например, для записи сигналов в густом переплетении растений или при плохих погодных условиях в полевых условиях. Основными плюсами пьезоэлемента являются простота и скорость крепления датчика, т.е. он необходим прежде всего для записи первичного сигнала в полевых условиях. Лазерный виброметр необходим для калибровки тестовых стимулов, что не позволяет сделать пьезоэлектрический адаптер.

Для регистрации (проверки наличия) акустической компоненты сигнала запись параллельно велась на микрофон (4191, 1/2 inch; Brüel & Kjær, Naerum, Denmark), расположенный на расстоянии 1–3 см от насекомых.

Кроме того, регистрацию вибрационных сигналов в лаборатории проводили на мембране низкочастотного микрофона, как на нерезонансном субстрате. Данный метод, несмотря на простоту, до сих пор применяется при записи сигналов, ис-

пользуемых для создания модельных стимулов, чтобы минимизировать влияние живого природного субстрата на исходную структуру сигнала (Cokl, 2008).

Частота дискретизации сигнала во всех случаях 44.1 кГц. Такая частота более чем достаточна, так как доминантная частота вибрационных сигналов в основном находится в районе 200 Гц.

Измерение амплитудно-временных параметров сигналов проводили в программе CoolEdit (США, Syntrillium).

### *Предъявление стимулов*

Для генерации стимулов применяли вибростенд 4810 (Brüel & Kjær). Оборудование дает возможность воспроизводить сигнал с заданной частотой и амплитудой в частотном диапазоне от 0 до 18 кГц, что полностью покрывает частотный диапазон вибраций насекомых. В качестве стимулов служили ранее зарегистрированные естественные коммуникационные сигналы. Предполагается, что использование вибрационных стимулов более перспективно, чем акустических, так как они подаются непосредственно на растение и не оказывают раздражающего эффекта на другие объекты, находящиеся в окружающем пространстве. Новые данные говорят о том, что на практике вибрационные стимулы должны быть эффективны на широком спектре растений, за исключением разве что травянистых культур.

В качестве стимулов использовали фрагменты призывного (рис. 1, б) и конкурентного сигналов (д) длительностью 5 с.

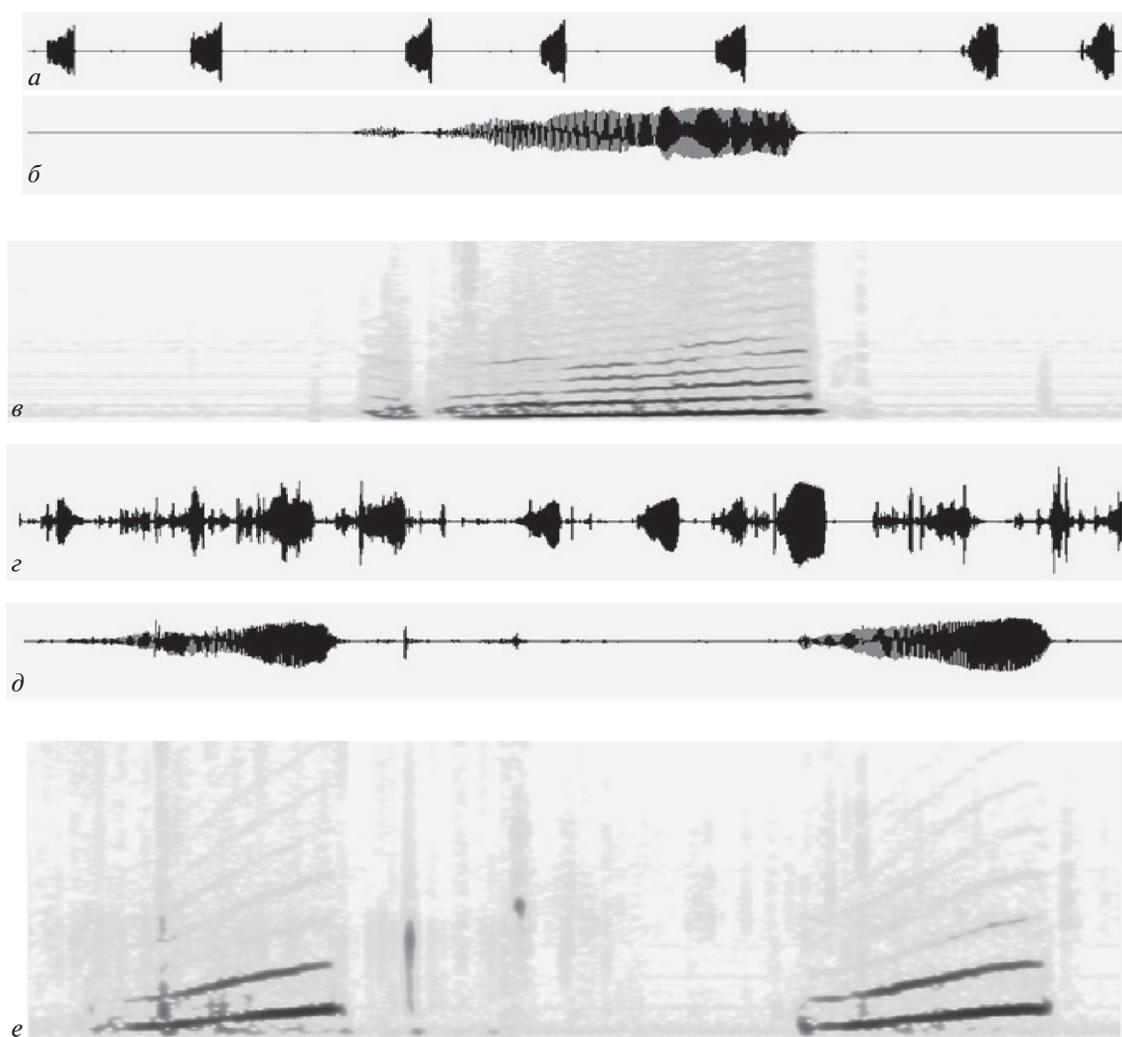
В эксперименте использовали самок *Pentatoma rufipes* (L.), выведенных из нимф и не имевших опыта копуляции.

Для фото и видеотипирования поведения во время экспериментов использовалось следующее оборудование: видеокамера Sony HDR-CX405 и системная камера Sony Alpha Nex-3N + макрообъектив Sony SEL 30M35. Для содержания культуры насекомых использовались террариумы Hagen EctoTerra 30 × 30 × 45 см.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Самцы *P. rufipes* L. издают два основных типа вибрационных сигналов – конкурентные (а–в) и призывные (г–е).

Конкурентные сигналы самцов представлены серией непродолжительных посылок. Они издаются при непосредственном контакте самцов. При эмиссии сигнала насекомое приподнимается над субстратом и покачивается в сторону соперника, насекомые могут сцепляться передними лапами и пытаться сбросить друг друга с субстра-



**Рис. 1.** Осциллограммы (*a, б, c, д*) и сонограммы (*е, е*) конкурентного (*a–е*) и призывного (*c–е*) сигналов самца *Pentatoma rufipes*. Развертка осциллограмм: *a, c* – 30 с; *б, д* – 5 с. Сонограммы даны для осциллограмм – *б, д*.

та. После эмиссии сигнала на растении всегда остается один самец, или самец и самка.

Призывные сигналы издаются как одиночно, так и в смешанных по полу группах и не сопровождаются агонистическим поведением. Подробно характеристики вибрационных сигналов описаны в предыдущей работе (Shestakov, 2015).

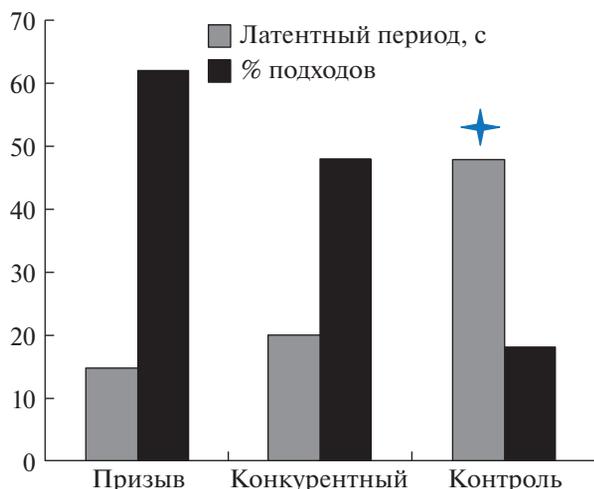
В качестве стимулов мы использовали и призывные ( $N = 16$ ), и конкурентные ( $N = 15$ ) сигналы. Это связано с тем, что теоретически сигналы могут быть полифункциональными и конкурентный сигнал для самца (для самки) может, наоборот, нести информацию о потенциальном партнере.

Оценивали два основных поведенческих ответа самок на стимул – латентный период от начала применения стимула до старта активного перемещения самки и процент успешных подходов к ис-

точнику стимула. Контроль – отсутствие стимула ( $N = 15$ ).

Латентные периоды при стимуляции и без значительно отличались. В большинстве случаев при предъявлении стимула самки переходили из состояния покоя/питания в состояние активного перемещения по растению. В контроле насекомые в основном сидели на растении, либо перемещались на незначительные расстояния, меняя точку питания. При этом процент положительных ответов на стимулы был значительно выше, чем в контроле ( $U$  – критерий Манна–Уитни;  $*p < 0.05$ ). Латентный период до начала активности в отсутствие стимула, наоборот, был значительно больше ( $U$  – критерий Манна–Уитни;  $p < 0.05$ ) (рис. 2).

Достоверных различий в количестве подходов к источнику стимула при трансляции призывного и конкурентного сигнала не выявлено. Однако



**Рис. 2.** Латентные периоды до начала движения и процент успешных подходов к источнику стимула у самок *Pentatoma rufipes*.

заметна тенденция увеличения количества подходов при проигрывании призывного сигнала (62 и 48% соответственно).

### ОБСУЖДЕНИЕ

Применение вибрационных стимулов эффективно меняет поведение насекомых на растении (Djemai et al., 2001; de Groot et al., 2010). В нашей предыдущей работе показано, что искусственное предъявление дизруптивных сигналов самки эффективно препятствует копуляции уже сложившихся пар, чем снижает численность насекомых на растении (Шестаков, 2020). Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными на других группах насекомых. Так, на листоволочках показано, что трансляция дизруптивных сигналов самцов снижает численность насекомых на растении винограда (Nieri, Mazzoni, 2018; Avosani, 2020). Этот эффект связан с невозможностью успешной коммуникации и нарушением поиска и распознавания самцов и самок из-за помех, создаваемых транслируемым стимулом. Предполагается, что растение перестает быть комфортным субстратом для насекомых в виду невозможности успешной коммуникации на нем.

Применение привлекающих стимулов также может быть весьма эффективным. Реакции *P. rufipes* на конкурентный и призывный сигналы достоверно отличались от контроля, и процент успешных подходов к источнику стимула был достаточно высок. Незначительная разница в реакции самок на стимулы, созданные на основе конкурентного и призывного сигналов самца, по нашему мнению, может быть обусловлена несколькими факторами: сходством частотного диапазона и возможной полифункционально-

стью сигнала агрессии. Многие животные могут использовать один и тот же тип сигнала для решения разных задач. В данном случае сигнал агрессии используется при взаимодействии между самцами, но теоретически он может давать находящимся рядом самкам информацию о находящихся рядом самцах и их индивидуальных характеристиках.

Оба типа сигналов эффективно привлекали самок к источнику стимула по сравнению с контролем. Таким образом, вибрационные стимулы могут использоваться как дополнительный фактор привлечения насекомых в различные типы ловушек: клеевые, феромонные. Некоторые данные говорят о том, что совместное использование феромонных и вибрационных стимулов делает клеевые ловушки достоверно более привлекательными.

Кроме того, сигналы жертвы могут привлекать на растение потенциальных хищников и паразитов (Virant-Doberlet et al., 2019). Трансляция искусственных сигналов вредителей могла бы заранее привлекать на растение поедающих их хищников и тем самым предотвращать массовые вспышки численности.

Мы считаем, что в условиях перехода к безопасному органическому земледелию акустические методы контроля могли бы стать хорошей альтернативой пестицидам и дополнительным инструментом, наряду с феромонными, механическими ловушками и бактериальными препаратами.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 20-04-00553 А).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Шестаков Л.С. Дизруптивные сигналы – эффективный механизм прерывания нежелательной копуляции у *Pentatoma rufipes*. *Сенсорные системы*. 2020. Т. 34 (1). С. 12–14.  
<https://doi.org/10.31857/S0235009220010102>

Avosani S., Sullivan T.E, Ciolli M., Mazzoni V., David Maxwell Suckling. Can Vibrational Playbacks Disrupt Mating or Influence Other Relevant Behaviours in *Bactericera cockerelli* (Triozidae: Hemiptera)? *Insects*. 2020. V. 11. P. 299.  
<https://doi.org/10.3390/insects11050299>

Cokl A. Stink bug interaction with host plants during communication. *J. Ins. Physiol.* 2008. V. 54. P. 1113–1124.

Djemai I., Casas J., Magal C. Matching host reactions to parasitoid wasp vibrations. *Proc. R. Soc. B*. 2001. V. 268. P. 2403–2408.  
<https://doi.org/10.1098/rsbp.2001.1811>

de Groot M., Cokl A., Virant-Doberlet M. Effects of heterospecific and conspecific vibrational signal overlap and signal-to-noise ratio on male responsiveness in *Nezara viridula* (L.). *J. Exp. Biol.* 2010. V. 213. P. 3213–3222.

- Nieri R., Mazzoni V. Open-field vibrational mating disruption: the effect on leafhopper pests and their predators. *IOBC-WPRS Working Group "Integrated Protection in Viticulture"*. 2018. V. 139. P. 31–34.
- Malek R., Zapponi L., Eriksson A., Ciolli M., Mazzoni, Anfora G., Tattoni C. Monitoring 2.0: Update on the Halyomorpha halys Invasion of Trentino. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. V. 8. P. 564. <https://doi.org/10.3390/ijgi8120564>
- Powell G. The biology and control of an emerging shield bug pest, *Pentatoma rufipes* (L.) (Hemiptera: Pentatomidae). *Agricultural and Forest Entomology*. 2020. <https://doi.org/10.1111/afe.12408>
- Panizzi A.R., McPherson J.E., James D.G., Javahery M., McPherson R.M. Economic importance of stink bugs (Pentatomidae). Eds Schaefer C.W., Panizzi A.R. *Heteroptera of Economic Importance*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 2000. P. 421–474.
- Shestakov L.S. A comparative analysis of vibrational signals in 16 sympatric bug species (Pentatomidae, Heteroptera). *Entomological Review*. 2015. V. 95. № 3. P. 310–325.
- Suckling D.M., Mazzoni V., Roselli G., Levy M., Ioriatti C., Stringer L., Zeni V., Deromedi M., Anfora G. Trapping Brown Marmorated Stink Bugs: “The Nazgûl” Lure and Kill Nets. *Insects*. 2019. V. 10. P. 433. <https://doi.org/10.3390/insects10120433>
- Virant-Doberlet M., Kuhelj A., Polajnar J., Šturm R. Predator-Prey Interactions and Eavesdropping in Vibrational Communication Networks. *Front. Ecol. Evol.* 2019. V. 7. P. 1–15.

## The use of vibrational signals of insects to develop safe methods for pest control

L. S. Shestakov and A. Elhashash

<sup>a</sup> Russia Institute for Information Transmission Problems RAS, 127051 Moscow, Bolshoy Karetny per., 19, Russia

<sup>b</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 117198 Moscow, Miklukho-Maklaya Street, 6, Russia

<sup>#</sup>E-mail: zicrona@yandex.ru

The transition to organic farming requires new methods of pest control and management without the use of pesticides. Accumulated data on vibrational communication of insects show that the use of natural and modified pest signals can hinder their successful communication on the plant, thereby reducing their numbers. In this paper, we discuss the effectiveness of the use of stimuli on the example of the widespread and damaging a large range of plants of the species *Pentatoma rufipes* L.

*Key words:* behavior, communication, pest control

### REFERENCES

- Avosani S., Sullivan T.E., Ciolli M., Mazzoni V., Suckling D. Can Vibrational Playbacks Disrupt Mating or Influence Other Relevant Behaviours in *Bactericera cockerelli* (Triozidae: Hemiptera)? *Insects*. 2020. V. 11. P. 299. <https://doi.org/10.3390/insects11050299>
- Cokl A. Stink bug interaction with host plants during communication. *J. Ins. Physiol.* 2008. V. 54. P. 1113–1124.
- Djemai I., Casas J., Magal C. Matching host reactions to parasitoid wasp vibrations. *Proc. R. Soc. B*. 2001. V. 268. P. 2403–2408. <https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1811>
- de Groot M., Cokl A., Virant-Doberlet M. Effects of heterospecific and conspecific vibrational signal overlap and signal-to-noise ratio on male responsiveness in *Nezara viridula* (L.). *J. Exp. Biol.* 2010. V. 213. P. 3213–3222.
- Nieri R., Mazzoni V. Open-field vibrational mating disruption: the effect on leafhopper pests and their predators. IOBC-WPRS Working Group “Integrated Protection in Viticulture”. 2018. V. 139. P. 31–34.
- Malek R., Zapponi L., Eriksson A., Ciolli M., Mazzoni, Anfora G., Tattoni C. Monitoring 2.0: Update on the Halyomorpha halys Invasion of Trentino. 2019. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. V. 8. P. 564. <https://doi.org/10.3390/ijgi8120564>
- Powell G. The biology and control of an emerging shield bug pest, *Pentatoma rufipes* (L.) (Hemiptera: Pentatomidae). *Agricultural and Forest Entomology*. 2020. <https://doi.org/10.1111/afe.12408>
- Panizzi A.R., McPherson J.E., James D.G., Javahery M., McPherson R.M. Economic importance of stink bugs (Pentatomidae). Eds Schaefer C.W., Panizzi A.R. *Heteroptera of Economic Importance*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 2000. P. 421–474.
- Shestakov L.S. A comparative analysis of vibrational signals in 16 sympatric bug species (Pentatomidae, Heteroptera). *Entomological Review*. 2015. V. 95. № 3. P. 310–325.
- Shestakov L.S. Dizruptivnye signaly – effektivnyi mekhanizm preryvaniya nezhelatelnoi kopulyatsii u pentatoma rufipes [Disruptive song – an effective mechanism to prevent copulation in stink-bugs pentatoma rufipes] Sensornye sistemy [Sensory systems]. 2020. V. 34. № 1. P. 12–14 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/SO235009220010102>
- Suckling D.M., Mazzoni V., Roselli G., Levy M., Ioriatti C., Stringer L., Zeni V., Deromedi M., Anfora G. Trapping Brown Marmorated Stink Bugs: “The Nazgûl” Lure and Kill Nets. *Insects*. 2019. V. 10. P. 433. <https://doi.org/10.3390/insects10120433>
- Virant-Doberlet M., Kuhelj A., Polajnar J., Šturm R. Predator-Prey Interactions and Eavesdropping in Vibrational Communication Networks. *Front. Ecol. Evol.* 2019. V. 7. P. 1–15.

УДК 004.855.5

## МЕТОД АНСАМБЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СОВМЕСТНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

© 2021 г. И. И. Байков<sup>1</sup>, Е. А. Семенова<sup>1</sup>, А. И. Курмуков<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский университет, Высшая школа экономики”,  
101000 Москва, Мясницкая ул., 20, Россия*

<sup>2</sup> *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,  
127994 Москва, Большой Каретный пер., д. 19, Россия*

\*E-mail: kurmuikovai@gmail.com

Поступила в редакцию 01.09.2020 г.

После доработки 28.09.2020 г.

Принята к публикации 02.11.2020 г.

Мы предлагаем решение задачи совместной кластеризации (multi-view clustering), в которой каждый объект описывается не одним, а несколькими независимыми наборами признаков. В настоящей работе нашими объектами являются вершины графов, которые определены на общем множестве вершин, но обладают различными множествами ребер. Задача кластеризации вершин графа заключается в разбиении множества вершин на группы таким образом, чтобы количество ребер внутри одной группы было велико, а количество ребер между вершинами из разных групп было мало. Наш подход к ансамблированию позволяет адаптировать целый класс жадных алгоритмов кластеризации вершин графа для задачи совместной кластеризации. Обход вершин каждого графа производится независимо, а присвоение меток кластеров происходит на основе усредненной метрики качества. Мы демонстрируем результаты экспериментов на реальных и синтетических данных (с известной кластерной структурой). Результаты работы нашего алгоритма на реальных данных не уступают существующим методам, а на синтетических данных с большим количеством кластеров превосходят их.

*Ключевые слова:* кластеризация вершин графа, совместная кластеризация, ансамблирование, кластеризация, Louvain modularity

DOI: 10.31857/S0235009221010029

### ВВЕДЕНИЕ

Поиск сообществ (кластеризация объектов) является одной из фундаментальных задач машинного обучения. Тогда как методы снижения размерности позволяют снизить признаковое представление объектов, задача кластеризации позволяет уменьшить количество рассматриваемых объектов, объединяя их в группы (кластеры) на основе схожести, подходящие для интерпретации. Традиционно задача кластеризации формулируется для объектно-признаковой матрицы  $X_{n \times m}$ , в которой каждый из  $n$  объектов описывается набором из  $m$  признаков. Однако в реальных приложениях объекты могут быть описаны наборами признаков различной природы, т.е. вместо одной объектно-признаковой матрицы мы имеем дело с несколькими. В таком случае задача кластеризации превращается в задачу совместной кластеризации (“multi-view clustering”) (Bickel, Scheffer, 2004).

В реальных приложениях часто встречаются данные, характеризующиеся наборами признаков различной природы:

- веб-страницы, описываемые, с одной стороны, своим содержанием, а с другой — активностью пользователей (Chao et al., 2017);
- медицинские МРТ снимки, характеризующиеся набором параметров пациента (пол, возраст, диагноз), параметрами съемки (сила магнитного поля, задержка и продолжительность воздействия), массивом пикселей, задающий изображение;
- видеозаписи, состоящие как из последовательности кадров, так и соответствующей им аудиодорожки, и другие.

На первый взгляд задача совместной кластеризации может быть сведена к задаче обычной кластеризации. Например, можно использовать только одну группу признаков или объединять

(конкатенировать) все наборы признаков в один. Однако такие подходы могут давать не лучшие результаты: группы признаков могут быть комбинаторны, и в таком случае хочется использовать всю имеющуюся информацию о структуре данных; простое объединение может приводить к тому, что признаки одной природы будут преобладать над остальными (например, из-за эффектов масштаба), вследствие чего нивелировать их влияние на структуру кластеров (Yang, Wang, 2018). Существующие методы для решения задачи совместной кластеризации можно условно разделить на три категории.

Первым широко используемым методом является подход, основанный на построении метаграфа (Strehl, Ghosh, 2002). Объекты независимо кластеризуются в каждом признаковом представлении любым выбранным алгоритмом (например, методом  $k$ -средних), после чего строится граф, в котором вершины соответствуют объектам, а вес ребра между двумя вершинами равен доле кластеризаций, в которых два соответствующих объекта попали в один и тот же кластер. Затем вершины полученного графа кластеризуются с использованием любого алгоритма кластеризации вершин графа. Результирующую раскраску можно считать решением задачи совместной кластеризации первоначальных объектов. Такой подход оказывается очень чувствителен к выбору алгоритма кластеризации на первом шаге и алгоритма поиска сообществ вершин на втором. Кроме того, структура построенного метаграфа учитывает только информацию об индивидуальных раскрасках и никак не учитывает признаковые представления, поэтому в реальных приложениях алгоритм может показывать невысокие результаты (Lancichinetti, Fortunato, 2012, Kurmukov et al., 2020).

Вторая группа методов также использует индивидуальные кластеризации, которые затем агрегируются жадным образом (Strehl, Ghosh, 2002). Сложность таких подходов может расти быстрее чем  $(m!)^k$ , где  $m$  — число кластеров, а  $k$  — число индивидуальных представлений объектов (число индивидуальных кластеризаций). Такая сложность возникает из-за того, что прежде всего необходимо установить соответствие между метками кластеров во всех имеющихся кластеризациях. Для этого используется матричное представление для меток кластеров: бинарная матрица размера — число объектов на число кластеров, в которой элемент с индексами  $i, j$  равен единице, если  $i$ -е наблюдение принадлежит  $j$ -му кластеру (и нулю в противном случае). Для установления соответствия между двумя кластеризациями необходимо перебрать расстояния (например,  $l_2$  норму) между матрицами, с учетом всех возможных перестано-

вок столбцов этих матриц, т.е.  $m!m!$ , и выбрать минимальное. Во многих реальных задачах количество кластеров и количество индивидуальных представлений мало, и такое решение может быть использовано.

Вышеперечисленные подходы очень удобны, потому что позволяют использовать существующие алгоритмы кластеризации без каких-либо модификаций. Их главный недостаток заключается в том, что для получения результирующей кластеризации используется только информация об индивидуальных раскрасках (индивидуальные кластеризации на основе разных групп признаков) и не используется признаковое представление. Последняя группа методов заключается в модификации существующих алгоритмов кластеризации. Так, например, большое количество подходов модифицируют алгоритмы спектральной кластеризации, определенным образом регуляризуя Лапласианы индивидуальных представлений (Yang, Wang, 2018). Несмотря на большое количество разработанных методов совместной кластеризации для табличных данных (т.е. данных, в которых объекты описываются набором признаков), в литературе практически отсутствуют методы совместной кластеризации, специфичные для кластеризации вершин графов.

В настоящей работе мы рассматриваем задачу поиска сообществ вершин графов (совместная кластеризация вершин графов) для графов, определенных на одном множестве вершин, но обладающих разными наборами ребер. Будем называть такие графы — графами индивидуального представления. Например, это могут быть транспортные сети, в которых вершинами служат транспортные развязки, а ребрами — дороги между ними для автомобилей и пешеходов или транспортная загруженность в разное время суток. В качестве другого примера могут служить коннекты — графы головного мозга, восстановленные по МРТ снимкам (Kurmukov et al., 2016). Вершинами в коннектах выступают регионы головного мозга, а ребрами — связи между ними (например, пучки нейронов, тянущиеся из одного региона в другой, или функциональная коактивация этих регионов). У разных пациентов вершины их коннектов будут относиться к одним и тем же анатомическим зонам (таким образом, разные пациенты разделяют один и тот же набор вершин), но ребра будут отличаться.

Предлагаемый нами алгоритм заключается в одновременной кластеризации вершин всех имеющихся графов. Он применим для целого класса

<sup>1</sup> Без потери общности можно считать, что количество кластеров во всех кластеризациях одинаково. Если оно отличается, добавим необходимое количество столбцов, состоящих из 0 в матрицу, представляющую кластеризацию с меньшим числом кластеров.

жадных алгоритмов, в которых решение о перемещении данной вершины из одного сообщества в другое принимается на основе эвристической метрики, например, модулярности (modularity). Алгоритм сводится к одновременному обходу (в одинаковом порядке) вершин графов, принятие решения о перемещении текущей вершины в новый кластер происходит на основе взвешенного голосования большинства. В качестве примера мы демонстрируем результаты модификации алгоритма Louvain modularity (Blondel et al., 2008) для задачи совместной кластеризации, однако наш метод также может быть применен и для других алгоритмов, например, Label propagation (Raghavan et al., 2007) или Leiden (Traag et al., 2019). Мы приводим результаты экспериментов как на реальных данных (с неизвестной кластерной структурой), так и на синтетическом наборе данных.

### МЕТОДЫ

Введем необходимые обозначения. Обозначим за  $G(V, E)$  граф (сеть) на множестве вершин  $V$ , с множеством ребер  $E : V \times V$ , такой граф может быть задан матрицей смежности  $A$  размера  $n \times n$ , где  $n = |V|$ , элемент матрицы  $A_{ij}$  содержит вес ребра между вершинами  $i$  и  $j$ . Раскраской или кластеризацией графа будем называть вектор  $l$  длины  $n$  такой, что если две вершины  $i$  и  $j$  лежат в одном кластере, компоненты вектора  $c_i$  и  $c_j$  принимают одно значение, а если две вершины лежат в разных кластерах, то соответствующие компоненты вектора  $c$  принимают разные значения. Количество уникальных значений вектора  $c$  совпадает с количеством кластеров и обозначается буквой  $m$ . Модулярностью (Newman, 2006) называется характеристика графа и его раскраски, задаваемая формулой

$$Q(A, c) = \frac{1}{2b} \sum_{i,j} \left[ A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2b} \right] \delta(c_i, c_j), \quad (1)$$

здесь  $b = \frac{1}{2} \sum_{i,j} A_{ij}$  (сумма весов ребер в графе),  $A_{ij}$  – вес ребра между вершинами  $i$  и  $j$ ,  $k_i = \sum_j A_{ij}$  – сумма весов ребер, инцидентных вершине  $i$ . Функция  $\delta(c_i, c_j)$  принимает значения единицы, если вершины  $i$  и  $j$  лежат в одном кластере и ноль иначе. Модулярность отражает то, насколько чаще возникают ребра между вершинами из одного кластера по сравнению со случайным графом Эрдёша-Рени. В случайном графе вероятность возникновения ребра между двумя вершинами пропорциональна произведению их степеней:

$$p(A_{ij}) \sim \frac{k_i k_j}{2b},$$

здесь в качестве нормировочного коэффициента выступает число ребер во всем графе (или сумма весов ребер по всему графу, если рассматривается взвешенный граф). В графе с сильной кластерной структурой эта вероятность также будет пропорциональна степеням ребер, но нормировочный коэффициент будет меньше (сумма весов ребер внутри кластера) и частота возникновения ребер внутри кластера будет выше.

#### Алгоритм Louvain modularity

Перед тем как описать предложенный алгоритм совместной кластеризации, опишем работу метода, который мы будем модифицировать. Алгоритм поиска сообществ Louvain modularity – это иерархический, жадный алгоритм, оптимизирующий модулярность. Алгоритм стартует с кластеризации, в которой каждая вершина принадлежит своему кластеру и состоит из двух шагов.

На первом шаге все вершины обходятся в случайном порядке, для текущей вершины  $i$  рассчитывается возможный прирост модулярности при переносе этой вершины из текущего кластера в кластер  $C$  одного из ее соседей:

$$\Delta Q = \frac{1}{2b^2} \left[ bk_{i,in} - k_i \sum_{tot} \right],$$

здесь  $\sum_{tot}$  – сумма весов ребер, исходящих от сообщества  $C$ ,  $k_i$  – степень вершины  $i$ ,  $k_{i,in}$  – сумма весов ребер от вершины  $i$  к вершинам в сообществе  $C$  и  $b$  – сумма всех весов (ребер) в графе. Текущая вершина  $i$  перемещается в тот кластер, для которого  $\Delta Q$  оказывается максимальной. Обход вершин производится до тех пор, пока существуют положительные  $\Delta Q$ .

На втором шаге алгоритма строится мета граф, вершины которого – это сообщества, полученные на предыдущем шаге, а веса ребер между двумя вершинами равны сумме всех ребер между вершинами соответствующих сообществ. На результирующем графе запускается первый шаг.

Алгоритм работает до тех пор, пока объединение сообществ в вершины приводит к приросту значения модулярности.

#### Предложенный метод ансамблирования<sup>2</sup>

Теперь дадим описание предлагаемому методу ансамблирования. Пусть дан набор графов  $G_1(V, E_1), \dots, G_k(V, E_k)$ , задаваемых своими матрицами смежности  $A^1, \dots, A^k$ . Задача совместной кластеризации вершин заключается в поиске та-

<sup>2</sup> Имплементация метода и экспериментов доступны онлайн <https://github.com/Inur-Baykov/Clustering-in-HSE-2-course>

кой раскраски  $c^*$ , которая является общей для всех графов  $G_1(V, E_1), \dots, G_k(V, E_k)$ , т.е. максимизирует среднюю модулярность:

$$c^* = \operatorname{argmax}_c \sum_i^k Q(A^i, c). \quad (2)$$

Пусть даны некоторый порядок обхода вершин  $T$  и числовая метрика  $q(i, c)$ , на основе которой вершина  $i$  помещается в кластер  $c$  (в случае Louvain modularity в качестве такой числовой метрики выступает  $\Delta Q$ ). Вершина  $i$  помещается в кластер  $c^*$  такой, что:

$$c^* = \operatorname{argmax}_{c \in \operatorname{neigh}(i)} q(i, c), \quad (3)$$

где  $\operatorname{neigh}(i)$  — это множество уникальных кластеров соседей вершины  $i$ . Предложенная модификация алгоритма заключается в изменении этого правила: вершине  $i$  присваивается метка того кластера, для которого достигается максимальное значение метрики  $q(i^k, c)$  среди всех графов  $G_1(V, E_1), \dots, G_k(V, E_k)$ , среди всех возможных соседей вершины  $i$ .

Приведем **пример** модификации алгоритма Louvain modularity для решения задачи совместной кластеризации.

На первом шаге фиксируем порядок обхода вершин для всех графов. Для текущей вершины  $i$  рассчитываем прирост модулярности для каждого графа индивидуального представления:  $\Delta Q_1, \dots, \Delta Q_k$ , вершина  $i$  помещается в кластер той вершины своего соседа, в котором достигается наибольший суммарный прирост модулярности (для каждой вершины соседа мы складываем соответствующие  $\Delta Q$  во всех индивидуальных представлениях). Обход вершин производится до тех пор, пока перемещение вершин позволяет увеличить модулярность.

Второй шаг аналогичен шагу в Louvain modularity с той разницей, что мы строим  $k$  метаграфов (их вершины совпадают, а ребра будут отличаться, поскольку они построены по разным графам индивидуальных представлений).

Далее будем называть предложенный алгоритм методом ансамбля.

#### Кластеризация на основе метаграфа

Результаты работы предложенного метаалгоритма мы сравниваем с двумя методами консенсус-кластеризации сетей:

- кластеризация графа, заданного средней матрицей смежности (далее *Средний граф*).
- кластеризация графа на основе метаграфа (Strehl, Ghosh, 2002) (далее *Консенсус метаграфа*).

Первый способ заключается в том, чтобы вместо отдельных графов  $G_1, \dots, G_k$  рассматривать граф  $\hat{G}$ , заданный усредненной матрицей смежности:  $\hat{A} = \frac{1}{k} \sum_i^k A^i$ . Вершины такого графа можно кластеризовать с использованием любого алгоритма (мы использовали Louvain modularity).

Второй способ основан на идее построения метаграфа. Графы  $G_1, \dots, G_k$  кластеризуются индивидуально с использованием выбранного алгоритма кластеризации (мы брали традиционный Louvain modularity). На основе полученных кластеризаций<sup>3</sup>  $c_1, \dots, c_k$  строится плотный метаграф  $M$ , в котором вершины соответствуют вершинам исходных графов, а вес ребра между двумя вершинами  $i$  и  $j$  равен доле раскрасок, в которых вершины  $i$  и  $j$  оказались в одном кластере. Полученный метаграф кластеризуется алгоритмом Louvain modularity.

#### Метрика качества

Для сравнения полученных средних кластеризаций мы использовали меру схожести Rand Index. Метрика Rand Index учитывает возможность переобозначения меток кластеров и рассчитывается как доля пар вершин с согласованной разметкой по отношению к общему количеству пар вершин:

$$RI = \frac{2(a+b)}{[n(n-1)]},$$

где  $a$  — количество пар вершин в раскрасках  $S_1, S_2$ , таких, что они имеют один цвет и в раскраске  $S_1$ , и в раскраске  $S_2$ ;  $b$  — количество пар вершин таких, что они имеют разный цвет и в раскраске  $S_1$ , и в раскраске  $S_2$ ;  $n$  — количество вершин в графе.

В экспериментах мы используем Adjusted Rand Index (Hubert, Arabie, 1985) — это скорректированная на случайность версия индекса Рэнда, которая принимает значение, близкое к нулю (может быть отрицательным) в случае, если совпадения двух кластеризаций на уровне случайности, и единица для идентичных кластеров (с точностью до переобозначения меток кластеров).

Для определения качества совместной кластеризации на реальных данных использовалось значение средней модулярности (формула 2).

#### Синтетические данные

Задача оценки качества работы методов кластеризации осложняется тем, что их сравнение с

<sup>3</sup> Здесь нижний индекс обозначает кластеризации отдельных графов, а не компоненты одного вектора меток кластеров.

использованием размеченной выборки не всегда может быть корректно. Сообщества вершин, выделяемые разными алгоритмами, могут быть осмысленными и оправданными с точки зрения структуры связей, но при этом не совпадать с разметкой. Например, рассмотрим граф социальной сети, в котором вершины соответствуют людям, а ребра возникают между двумя людьми, состоящими друг у друга в друзьях. В таком графе естественным образом возникают сообщества (или кластеры, т.е. группы вершин с большим количеством связей внутри сообщества и малым числом связей с вершинами из другого сообщества) людей, объединенных, например, местом учебы или проживания. Предположим, что ручная разметка этих вершин соответствует их политическим предпочтениям, это свойство может найти отражение в структуре связей (эффект, известный как ассортативность, “assortativity mixing” (Newman, 2003)), но совершенно не обязательно будет преобладать. Таким образом, для оценки качества работы алгоритмов кластеризации можно использовать следующие подходы:

- замена задачи поиска сообществ на вспомогательную, как, например, в методе  $k$ -средних, в котором минимизируется суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров;
- использование данных малого размера с известной кластерной структурой или синтетических данных (также с известной кластерной структурой);
- экспертная интерпретация полученных кластеров.

В случае задачи совместной кластеризации для существующих реальных данных неизвестна “истинная” кластерная структура, кроме того, синтетический набор данных позволяет протестировать работу предложенного алгоритма в различных условиях: при различном числе вершин, ребер и кластеров.

Для генерации взвешенных графов с известной кластерной структурой мы использовали геометрическую модель:

1. Фиксируем количество вершин  $n$ , количество кластеров  $m$ , количество графов индивидуальных представлений  $k$ .
2. Генерируем смесь из  $m$  гауссовских распределений со средними  $\mu_1, \dots, \mu_m$  и матрицами ковариации  $\sigma_1, \dots, \sigma_m$  в  $R^3$ . Размеры кластеров брали одинаковыми.
3. Генерируем полный граф  $G(V, E)$ , в котором вершинами служат точки из п. 2 (их принадлежность к кластеру определяется принадлежностью к компоненте гауссовской смеси), а вес ребра между двумя вершинами обратно пропорциона-

лен расстоянию между ними (чем больше расстояние, тем меньше вес).

4. Генерируем графы индивидуальных представлений  $G_1(V, E_1), \dots, G_k(V, E_k)$  спарсификацией случайных ребер графа  $G$ . Таким образом,  $|E_1| = |E_2| = \dots = |E_k| = (1 - p) * |E|$ .

В ходе экспериментов мы варьировали параметры  $m$  и  $p$ .

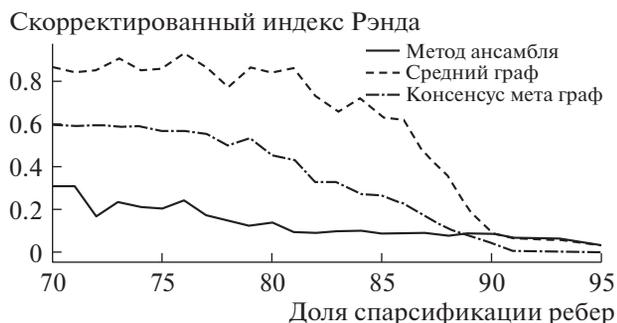
### Данные ADNI

Для экспериментов на реальных данных мы использовали набор данных, подготовленный в рамках Alzheimer’s Disease Neuroimaging Initiative (Mueller et al., 2005). Обработанные данные представляют из себя взвешенные неориентированные графы на 68 вершинах, восстановленные по снимкам магнитно-резонансной томографии (МРТ). Данные собраны по 228 участникам (807 снимков). Средний возраст пациентов на первичном осмотре  $72.9 \pm 7.4$  года (96 женщин и 132 мужчины). Для каждого человека имеется не менее одного и не более шести снимков МРТ головного мозга. Данные включают 47 пациентов с диагностированной врачами болезнью Альцгеймера, 40 пациентов с ранними нарушениями когнитивных функций, 80 пациентов с поздней стадией умеренного нарушения когнитивных функций и 61 пациент без патологии. Для разметки вершин графа был использован атлас Десикана–Киллиани (DK) (Desikan et al., 2006), который включает 68 областей головного мозга. Веса ребер в исходной матрице кортикальных связей пропорциональны количеству трактов, обнаруженных алгоритмом трактографии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Описание экспериментов

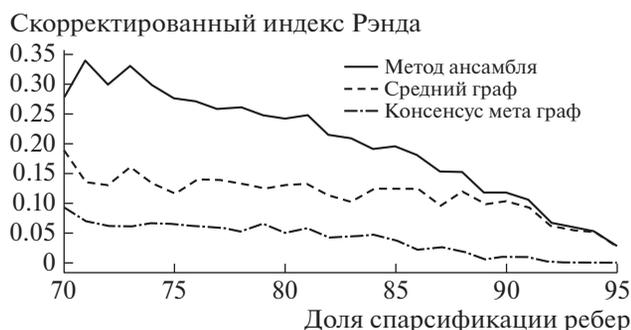
Для оценки качества работы алгоритмов граф  $G$  спарсифицировался на заданном уровне  $p$ . Мы генерировали  $k$  графов индивидуальных представлений, вершины которых кластеризовались с использованием трех различных методов: предложенный метод ансамблирования; при помощи метаграфа; при помощи графа, заданного средней матрицей смежности. Полученная кластерная структура сравнивалась с истинной (принадлежность к компонентам гауссовской смеси) с использованием меры похожести ARI (adjusted rand index). Затем уровень спарсификации  $p$  увеличивался, и вся процедура повторялась. Значения уровня спарсификации изменялось в пределах  $[0.8, 0.975]$  с шагом 0. Полученные значения ARI приведены на рис. 1, 2 и 3, качество совместной кластеризации при разных уровнях спарсификации в терминах ARI (больше – лучше). Для оценки влияния количества кластеров на каче-



**Рис. 1.** Усреднение проводилось по 10 графам с 1000 вершинами и 25 кластерами.



**Рис. 2.** Усреднение проводилось по 10 графам с 1000 вершинами и 50 кластерами.



**Рис. 3.** Усреднение проводилось по 10 графам с 1000 вершинами и 100 кластерами.

ство работы алгоритма процедура, описанная выше, была проведена для графов с 10, 25 и 50 кластерами. Полученные результаты, усредненные для различных уровней спарсификации, приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Средние значения ARI (больше – лучше). Усреднение происходило для различных уровней спарсификации, для 10 графов

Алгоритм	10 кластеров	25 кластеров	50 кластеров
(предложенный) Метод ансамбля	0.14	0.19	0.20
Средний граф	0.57	0.30	0.12
Консенсус метаграф	0.31	0.09	0.04

Эксперименты с реальными данными были устроены следующим образом. Мы получили совместные кластеризации с использованием трех методов: предложенный метод ансамблирования; при помощи метаграфа; при помощи графа, заданного средней матрицей смежности. Затем полученные раскраски были использованы для расчета модулярности на всех графах из набора данных ADNI. Были получены следующие значения модулярности (среднее  $\pm$  стандартное отклонение):  $0.368 \pm 0.028$  (средняя матрица смежности),  $0.356 \pm 0.027$  (предложенный метод ансамбля),  $0.364 \pm 0.029$  (средняя модулярность для индивидуальных, близких к оптимальным, разбиений).

### Анализ результатов

Результаты на синтетических данных показывают состоятельность предложенного метода в конфигурациях с большим числом сообществ (кластеров), рис. 2, 3. Для используемой схемы генерации синтетических данных можно было ожидать, что метод, использующий среднюю матрицу смежности, будет выходить победителем во всех экспериментах. Поскольку спарсификация графов происходит независимо из одного и того же графа, поэтому после усреднения ожидается значительное восстановление исходной структуры. По результатам экспериментов оказалось, что это происходит только для графов с относительно небольшим числом сообществ, а при увеличении числа кластеров предложенный алгоритм ансамблирования оказывается лучше.

Результаты на реальных данных показывают, что все подходы к получению средней кластеризации демонстрируют одинаковые результаты с точки зрения модулярности (в рамках одного стандартного отклонения). Отметим, что кластеризация, полученная предложенным алгоритмом ансамблирования, оказалась практически идентичной кластеризации, полученной на основе средней матрицы смежности (похожесть 0.84 ARI). После того как метки кластеров двух раскрасок были приведены в соответствие, только пять вершин (из 68) в двух раскрасках оказались в разных кластерах.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90157.

## General ensemble method for multi-view clustering

I. I. Baikov<sup>a</sup>, E. A. Semerova<sup>a</sup>, and A. I. Kurmukov<sup>a,b,#</sup>

<sup>a</sup> Higher School of Economics — National Research University,  
101000 Moscow, Myasnitskaya ulitsa, 20, Russian

<sup>b</sup> Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute),  
127994 Moscow, Bolshoy Karetny pereulok, 19, Russian

<sup>#</sup>E-mail: kurmukovai@gmail.com

Network community detection is a task of dividing a set of network's nodes into groups, such that intra-group connections are more dense than inter-group connections. We consider a specific type of clustering, so-called multi-view clustering, which deal with a set of graphs defined on the same set of nodes, but different edges. The goal is to divide nodes into subgroups taking into account all graphs. We propose an ensemble method for multi-view clustering, applicable to any greedy algorithm with nodes traversal. Instead of traversing nodes of the graphs individually, our approach does a co-clustering of all networks' nodes. Decision about node color takes into account connections in all input graphs. We demonstrate the performance of our method, applied on a popular Louvain modularity algorithm, using real dataset and a synthetic dataset (with known clustering structure).

*Key words:* community detection, multi-view clustering, ensemble methods, Louvain modularity

### REFERENCES

- Blondel V.D., Guillaume J.L., Lambiotte R., Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of statistical mechanics: theory and experiment*. 2008. V. 10. DOI: P10008.
- Bickel S., Scheffer T. Multi-view clustering. *ICDM*. 2004. V. 4. P. 19–26.
- Chao G., Sun S., Bi J. *A survey on multi-view clustering*. URL: <https://arxiv.org/abs/1712.06246>. 2017.
- Hubert L., Arabie P. Comparing partitions. *Journal of classification*. 1985. V. 2(1). P. 193–218.
- Kurmukov A., Dodonova Y., Zhukov L. Classification of normal and pathological brain networks based on similarity in graph partitions. *16th International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*. 2016. P. 107–112.
- Kurmukov A., Mussabaeva A., Denisova Y., Moyer D., Jhanshad N., Thompson P.M., Gutman B.A. Optimizing Connectivity-Driven Brain Parcellation Using Ensemble Clustering. *Brain Connectivity*. 2020. V. 10(4). P. 183–194.
- Lancichinetti A., Fortunato S. Consensus clustering in complex networks. *Scientific reports*. 2012. V. 2. P. 336.
- Newman M.E. Mixing patterns in networks. *Physical Review*. 2003. V. 67. DOI: 026126
- Newman M.E. Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006. V. 103 (23). P. 8577–8582.
- Raghavan U.N., Albert R., Kumara S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks. *Physical Review*. 2007. V. 76 (3). P. 036106.
- Desikan R.S., Ségonne F., Fischl B., Quinn B.T., Dickerson B.C., Blacker D., Buckner R.L., Dale A.M., Manguire R.P., Hyman B.T., Albert M.S., Killiany R.J. An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest. *NeuroImage*. 2006. V. 31. P. 968–980.
- Strehl A., Ghosh J. Cluster ensembles — a knowledge reuse framework for combining multiple partitions. *Journal of Machine Learning Research*. 2002. V. 3. P. 583–617.
- Mueller S.G., Weiner M.W., Thal L.J., Petersen R.C., Jack C.R., Jagust W., Beckett L. Ways toward an early diagnosis in Alzheimer's disease: the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI). *Alzheimer's & Dementia*. 2005. V. 1 (1). P. 55–66.
- Traag V.A., Waltman L., van Eck N.J. From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Scientific reports*. 2019. V. 9 (1). P. 1–12.
- Yang Y., Wang H. Multi-view clustering: A survey. *Big Data Mining and Analytics*. 2018. V. 1 (2). P. 83–107.

УДК 159.938.25 + 004.05

## УЛУЧШЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ДЕТЕКТОРА ОТРЕЗКОВ ПУТЕМ ДОБАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ПРИЗНАКОВ

© 2021 г. Л. А. Ерлыгин<sup>1,2,\*</sup>, Л. М. Тепляков<sup>2</sup><sup>1</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет),  
141701 Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Московская обл., Россия<sup>2</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук,  
127051 Москва, Большой Каретный переулок, д. 19, Россия

\*E-mail: erlygin.la@phystech.edu

Поступила в редакцию 28.09.2020 г.

После доработки 16.10.2020 г.

Принята к публикации 02.11.2020 г.

В данной работе рассматривается задача детектирования прямолинейных контуров (отрезков). В недавних исследованиях этой задачи было показано, что нейросетевые методы способны превосходить классические алгоритмы по качеству, однако высокая вычислительная сложность нейросетей стоит на пути внедрения их в приложения на замену быстрым классическим алгоритмам. В данной работе предлагается способ объединения нейросетевого и классического подходов к задаче для компенсации их недостатков путем подачи на вход нейросети не только изображения, но и результата работы классического алгоритма и комбинации предсказаний на выходе. Эта модификация “упрощает” задачу, стоящую перед нейросетью, и позволяет добиться высокого качества с использованием простой быстрой нейросети. Предложенный метод позволяет добиться 0.72 и 0.66 F1 на наборах Wireframe и York соответственно при скорости 14 FPS на CPU.

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, детектирование отрезков, детектирование контуров, U-net, Canny

**DOI:** 10.31857/S0235009221010042

### ВВЕДЕНИЕ

Детектирование отрезков – важный шаг во многих системах компьютерного зрения. При помощи детектирования отрезков решаются задачи позиционирования роботов (Bista et al., 2016), распознавания дорожной разметки (Huang et al., 2020) и документов (Zhukovsky et al., 2017).

В литературе встречаются несколько формулировок задачи детектирования отрезков, различающиеся по способу представления результатов детектирования – набора отрезков на изображении. Встречаются представления в виде: множества пар вершин (Grompone et al., 2012); графа вершин (Huang et al., 2018), в котором ребра соответствуют отрезкам, на одной вершине может быть инцидентно несколько ребер; классификации каждого пикселя изображения на принадлежность отрезку (Xue et al., 2019). В нашей работе мы используем последний способ представления отрезков.

Традиционно для решения задачи детектирования отрезков используются так называемые инженерные алгоритмы (Duda, Hart, 1972; Grompone et al., 2012). Они реализуют некий формальный критерий наличия отрезка на изображении, сформулированный, как правило, на основе градиента

изображения (Grompone et al., 2012) или образа изображения в пространстве Хафа (Duda, Hart, 1972).

Сегодня для детектирования отрезков набирают популярность нейросетевые методы (Lin et al., 2020; Xue et al., 2019). В отличие от рассмотренных инженерных алгоритмов, в нейросетевых подходах не производится формализация понятия “отрезок”, а детектирующий алгоритм строится путем обучения нейросети на большом количестве примеров.

Существенным недостатком нейросетевых методов, несмотря на их высокое качество, является низкая скорость работы. Так, в недавней работе (Xue et al., 2019) скорость нейросети составляет 6–10 FPS на дорогостоящем GPU, что, к примеру, соответствует обработке одного кадра на несколько метров движения беспилотного автомобиля.

В данной работе предлагается простой способ объединения нейросетевого и классического подходов к задаче для компенсации недостатков нейросети, путем подачи на вход небольшой нейросети не только изображения, но и результата работы классического алгоритма, что позволяет “упростить” задачу, стоящую перед нейросетью; и комбинации предсказаний на выходе для увеличения точности предсказания. Предложенный метод позволяет добиться 0.72 и 0.66 F1 на набо-

рах Wireframe и York (Huang et al., 2018; Coughlan, Yuille, 2003) соответственно при 14 FPS на CPU и 63 FPS на GPU.

Существующие подходы к детектированию отрезков можно разделить на две категории – инженерные и нейросетевые. В инженерных подходах определяется формальное понятие “отрезок” и на изображении ищутся объекты, удовлетворяющие этому определению; тогда как в нейросетевых подходах формализация понятия “отрезок” не производится, а детектирующий алгоритм строится путем обучения нейросети на наборе примеров.

### *Инженерные методы*

Среди инженерных методов можно выделить алгоритмы, основанные на преобразовании Хафа (Duda, Hart, 1972; Kiryati et al., 1991; Bandera et al., 2006). Как правило, такие алгоритмы состоят из следующих шагов: выделение контуров при помощи, например, алгоритма Canny (Canny, 1986), после которого пиксели отрезков обнаружены с высокой полнотой, но, возможно, низкой точностью; детектирование прямых на контурном изображении при помощи преобразования Хафа; разделение задетектированных прямых на отрезки с использованием контурного изображения.

Другая группа инженерных методов основана на так называемых “областях определения отрезка”, LSR (Line Support Regions) (Burns et al., 1986; Grompone et al., 2012). LSR – это область изображения с похожими ориентациями градиентов пикселей, которая потенциально содержит отрезок. Методы из этой группы выделяют множество LSR на изображении, а затем – определяют, в каких из них содержится отрезок. В работе (Burns et al., 1986) предполагается, что отрезку соответствует “скачок” в интенсивности пикселей. Для проверки, содержит ли LSR искомый “скачок”, пиксели LSR представляются как точки в трехмерном пространстве (две координаты и интенсивность) и аппроксимируются плоскостью. На основании полученных параметров аппроксимации делается вывод о наличии отрезка в данной LSR. В более новом методе (Grompone et al., 2012) вокруг каждой LSR описывается прямоугольник, а далее оценивается правдоподобие присутствия отрезка в прямоугольнике. Для этого подсчитывается доля пикселей внутри прямоугольника, для которых ориентация градиентов совпадает с ориентацией прямоугольника. Затем оценивается вероятность пронаблюдать такие доли на случайном изображении шума.

Рассмотренный алгоритм (Grompone et al., 2012) является одним из самых популярных детекторов отрезков – именно с ним производится сравнение большинства нейросетевых методов

(Huang et al., 2018), которые рассматриваются в следующем разделе.

### *Нейросетевые методы*

В последние годы для решения многих задач компьютерного зрения, например, классических задач классификации и детектирования объектов (в виде описанных прямоугольников) применяются нейронные сети (Krizhevsky et al., 2012; Ronneberger et al., 2015). Задача детектирования отрезков не стала исключением (Huang et al., 2018; Yichao et al., 2019; Xue et al., 2019).

В работе (Huang et al., 2018) задача детектирования отрезков декомпозируется на две подзадачи: поиск концов отрезков и попиксельная классификация пикселей на принадлежность отрезку. Для решения этих подзадач используются две независимые сети. Затем предсказания отдельных нейросетей объединяются для построения отрезков в виде пар точек. Для этого подсчитывается количество положительно классифицированных пикселей вдоль прямой, соединяющей пары задетектированных концов и, если таких пикселей достаточно много, считается, что между концами есть отрезок.

Схожий метод представлен в работе (Yichao et al., 2019). В этом подходе нейросеть, как и в (Huang et al., 2018), детектирует точки пересечения отрезков. После чего на основе точек пересечения предлагаются гипотезы отрезков и классифицируются нейросетью, в отличие от (Huang et al., 2018), где для верификации гипотез используется эвристика.

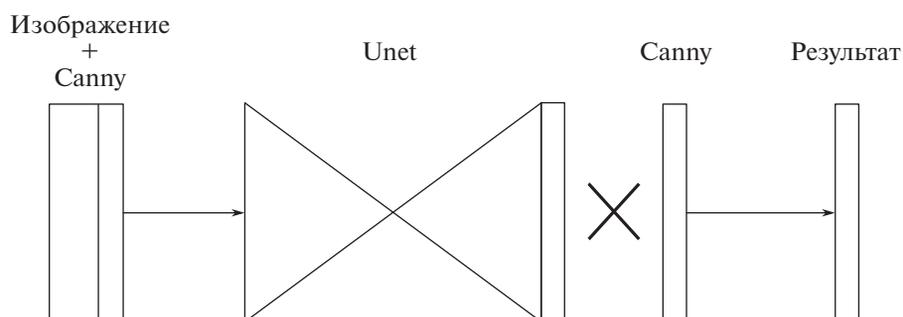
Другой подход к задаче детектирования отрезков использует тот факт, что задачу поиска отрезков можно свести к задаче сегментации изображения (Xue et al., 2019), где отрезкам соответствуют границы сегментов.

## МЕТОД

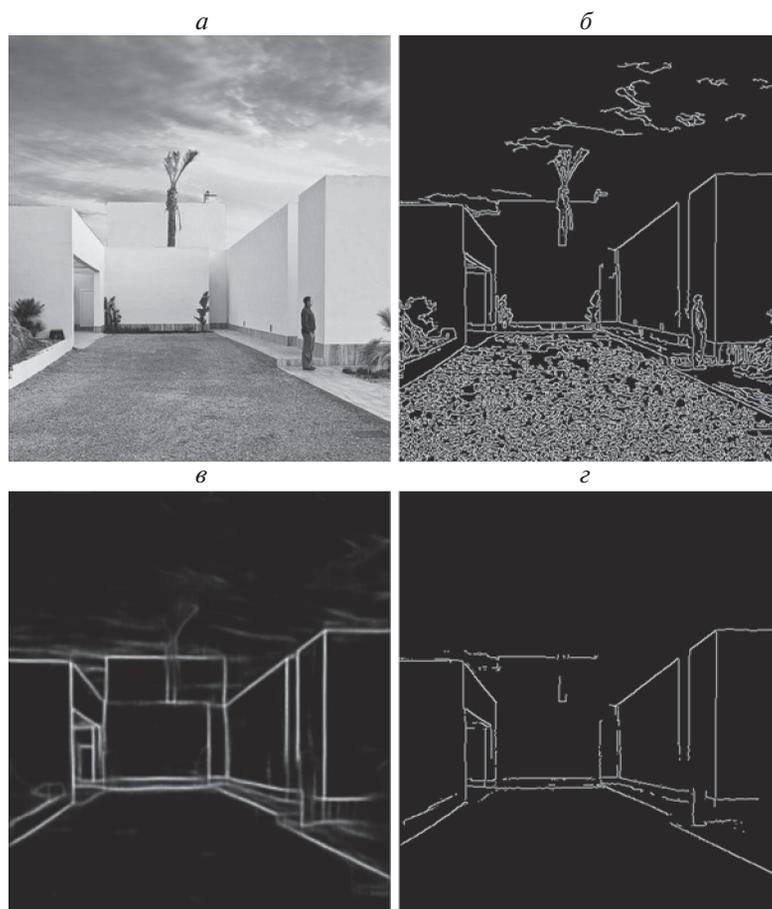
На рис. 1 изображена структура алгоритма, а на рис. 2 проиллюстрирован пример его работы. Помимо ставшей классической для подобных задач (Xue et al., 2019) нейросети архитектуры U-net (Ronneberger et al., 2015), предлагаются две следующие модификации.

Результат работы детектора Canny подается на вход нейросети вместе с изображением. Мы полагаем, что это позволяет упростить задачу, стоящую перед нейросетью, а значит, использовать меньше вычислений при эксплуатации и меньше данных при обучении. Границы, детектируемые Canny (рис. 2,б), являются полезными признаками для задачи детектирования отрезков, а значит их предварительное извлечение позволяет “сэкономить” вычисления внутри нейросети.

Результаты работы Canny (рис. 2,б) и нейросети (в) перемножаются для получения финального



**Рис. 1.** Иллюстрация предложенного метода. При помощи детектора Canny детектируются всевозможные контуры, затем четырехканальное изображение (RGB + Canny) подается нейросети, которая детектирует отрезки. Наконец, результат работы нейросети и Canny перемножаются для точной локализации отрезков.



**Рис. 2.** Пример работы предложенного метода. *a* – изображение; *б* – результат работы детектора Canny; *в* – результат работы нейросети; *г* – объединение результатов работы детектора Canny и нейросети.

результата (*г*). Детектор Canny детектирует всевозможные контуры с пиксельной точностью локализации; нейросеть детектирует искомые отрезки, однако точность локализации невысока – ширина детекций нейросети (*в*) составляет несколько пикселей. Их объединение позволяет получить точно локализованные контуры (преимущество Canny), которые при этом соответствуют искомому типу контуров – отрезкам (преимущество нейросети).

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

### *Архитектура и параметры обучения*

Мы использовали простую нейросеть типа U-Net (Ronneberger, et al., 2015) с 2 max-pooling слоями и с 16 сверточными фильтрами на первом сверточном слое, количество которых удваивается после каждого max-pooling слоя. Размер входного изображения  $256 \times 256$ .

Минимизируемая функция потерь – бинарная кросс-энтропия (Huang, et al., 2018). Оптимиза-

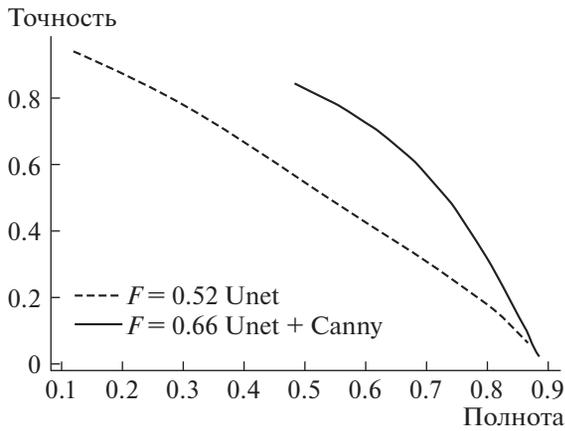


Рис. 3. Кривая точность – полнота для предложенного метода на наборе York и сравнение с обычным Unet.

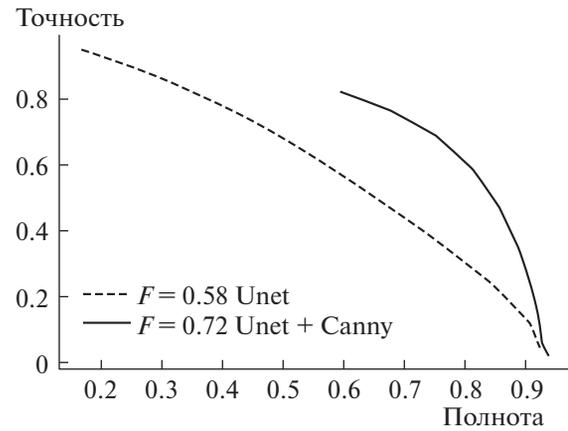


Рис. 4. Кривая точность – полнота для предложенного метода на наборе Wireframe и сравнение с обычным Unet.

цию проводили при помощи алгоритма Adam (Kingma, Ba, 2014).

Обучение производили с размером батча 32. Оно останавливалось, если в течение 30 эпох не наблюдалось уменьшения значения функции потерь на валидационном наборе. Скорость обучения уменьшалась в 2 раза, если значение функции потерь на валидационном наборе не уменьшалось в течение 15 эпох. Из-за стохастической природы обучения приведенные далее количественные результаты являются медианным значением по пяти повторениям обучения нейросети.

#### Наборы данных и оценка качества

Для анализа предложенного метода использовались популярные для задачи (Yichao et al., 2019; Xue et al., 2019) наборы Wireframe (Huang, et al., 2018) (обучение и тестирование) и York (Coughlan, Yuille, 2003) (только тестирование).

Качество оценивалось при помощи кривой точности – полноты (precision – recall). Для построения кривой истинные пиксели (через которые проходит некий отмеченный на изображении отрезок) сопоставлялись с задетектированными пикселями (для которых предсказание нейросети выше некоего порога), причем сопоставление

считалось успешным, если расстояние между пикселями не превосходило 1% от диагонали изображения (Huang et al., 2018). Это сопоставление позволяет вычислить точность и полноту. Такая метрика является стандартной для задачи детектирования отрезков (Yichao et al., 2019; Xue et al., 2020; Xue et al., 2019).

Для построения скалярной оценки качества работы алгоритма по кривой точности – полноты вычислялась F1 оценка для каждой точки кривой, и затем бралось максимальное значение F1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численный анализ предложенного метода приведен на рис. 3 и 4. Предложенные модификации существенно повышают качество детектирования по сравнению с Unet без модификаций.

Сравнение с другими методами и скорость работы представлены в табл. 1. Численные результаты методов цитируются по работам (Grompone et al., 2012; Xue et al., 2020; Yichao et al., 2019; Huang et al., 2018). Объективности сравнения могут помешать различия в программном и аппаратном обеспечении, использованном для замеров. Мы полагаем, что связанные с этим различия незначительны.

Таблица 1. Сравнение предложенного метода с другими методами

Методы	F1 Wireframe	F1 York	FPS CPU	FPS GPU
Unet + Canny	0.72	0.66	14	63
Unet	0.58	0.52	14	63
LSD	0.62	0.60	50	–
HAWP	0.80	0.65	–	29.5
L-CCN	0.77	0.62	–	15.6
(Huang et al., 2018)	0.72	0.61	–	2.24

Примечание: Численные результаты методов цитируются по работам (Grompone et al., 2012; Xue et al., 2020; Yichao et al., 2019; Huang et al., 2018). Объективности сравнения могут помешать различия в программном и аппаратном обеспечении, использованном для замеров. Мы полагаем, что связанные с этим различия незначительны.

Предложенный метод сравним с аналогичными методами по качеству на наборе wireframe, воспроизводит наилучшее качество для набора York и устанавливает наилучшую скорость на GPU, которая превосходит инженерный метод LSD на CPU.

### ВЫВОД

В данной работе рассматривается задача детектирования отрезков в виде классификации

пикселей изображения на принадлежность отрезку. Предложен метод построения быстрого и точного детектора на основе нейросети типа Unet и классического детектора границ Canny. Показано, что качество детектирования, составившее 0.72 F1 для набора Wireframe и 0.66 для набора York, сопоставимо с аналогами, а скорость работы 14 FPS на CPU и 66 FPS на GPU превосходит представленные в литературе методы.

## Improvement of a line segment detector based on a neural network by adding engineering features

L. A. Erlygin<sup>a,b,#</sup> and L. M. Teplyakov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
141701 Dolgoprudny, Institutsky per., 9, Moscow region, Russia

<sup>b</sup> Institute for Information Transmission Problems. A.A. Kharkevich Russian Academy of Sciences,  
127051 Moscow, Bolshoi Karetny lane, 19, Russia

<sup>#</sup>E-mail: erlygin.la@phystech.edu

In this work, we study the problem of line segment detection. In the recent studies of this problem, it was shown that neural network-based methods are able to outperform classical algorithms in accuracy, yet high computational complexity of neural networks limits their usage in real-world applications. In our work, we propose to fuse a neural network with a classical algorithm to compensate their flaws, by (i) feeding into the network not only an image, but also classical algorithm's output and (ii) by combining their predictions. We expect these modifications to simplify the problem faced by the neural network, resulting in higher accuracy in smaller network. Proposed method provides 0.72 and 0.66 F – measure on Wireframe and York datasets respectively with 14 FPS on CPU.

*Keywords:* artificial neural networks, line segment detection, contour detection, Unet, Canny

### REFERENCES

- Bandera A., Pérez-Lorenzo A., Bandera J.M., Sandoval F. Mean shift based clustering of hough domain for fast line segment detection. *Pattern Recognition Letters*. 2006. P. 578–586.
- Bista S.R., Giordano P.R., Chaumette F. Appearance-based indoor navigation by IBVS using line segments. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. P. 423–430.
- Burns J.B., Hanson A.R., Riseman E.M. Extracting straight lines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. P. 425–455.
- Canny J. A Computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. P. 679–698.
- Coughlan J.M., Yuille A.L. Manhattan world: orientation and outlier detection by bayesian inference. *Neural Comput.* 2003. P. 1063–1088.
- Duda R.O., Hart P.E. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Commun. ACM*. 1972. P. 11–15.
- Grompone von Gioi R., Jakubowicz J., Morel J.M., Randall G. LSD: A fast line segment detector with a false detection control. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2010. P. 722–732.
- Grompone von Gioi R., Jakubowicz J., Morel J.M., Randall G. LSD: A line segment detector. *Image Processing On Lin*. 2012. P. 35–55.
- Huang J., Wang Z., Liang H. Lane marking detection based on segments with upper and lower structure. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2020.
- Huang K., Wang Y., Zhou Z., Ding T., Gao S., Ma Y. Learning to parse wireframes in images of man-made environments. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. P. 626–635.
- Kingma D.P., Ba J.L. Adam: A Method for stochastic optimization, 2014.
- Kiryati N., Eldar Y., Bruckstein A.M. A probabilistic hough transform. *Pattern Recognition*. 1991. P. 303–316.
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012. P. 1097–1105.
- Lin Y., Silvia L., Pinte S. Deep hough-transform line priors, 2020.
- Ronneberger O., Fischer P., Tomar B. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. 2015.
- Xue N., Bai S., Wang F., Xia G., Wu T., Zhang L., Torr P. Learning regional attraction for line segment detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2019.
- Xue N., Wu T., Bai S., Wang F.D., Xia G.S., Zhang L. Holistically-attracted wireframe parsing, 2020.
- Yichao Z., Haozhi Q., Ma Y. End-to-end wireframe parsing. 2019.
- Zhukovsky A., Nikolaev D., Arlazarov V., Postnikov V., Polevoy D., Skoryukina N., Povolotsky M. Segments graph-based approach for document capture in a smartphone video stream. 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2017. P. 337–342.

УДК 004.932.2

## РАСПОЗНАВАНИЕ ПРОЕКТИВНО ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ПЛОСКИХ ФИГУР. XV. МЕТОДЫ ПОИСКА ОСЕЙ И ЦЕНТРОВ ОВАЛОВ С СИММЕТРИЯМИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ СЕТ ДУАЛЬНЫХ ПАР ЛИБО ТРИАДЫ ЧЕВИАН

© 2021 г. П. П. Николаев<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Институт проблем передачи информации им А.А. Харкевича РАН, 127051 Москва, Б. Каретный пер., 19, Россия

<sup>2</sup> ООО “Смарт Энджинс Сервис”, 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, 9, Россия

\*E-mail: nikol@iitp.ru

Поступила в редакцию 25.08.2020 г.

После доработки 29.09.2020 г.

Принята к публикации 02.11.2020 г.

Предложен и промоделирован ряд новых переборных процедур поиска элементов *симметрии* овальных кривых (их *осей* либо *центров*) на основе альтернативных методов, привлекающих одну из двух проективно инвариантных структур на поле фигуры: сет так называемых *дуальных пар* (ДП) либо *триады чевиан* (ТЧ), обладающих свойством их пересечения в общей внутренней точке  $c$  овала ( $o$ ). В данной работе каждая из двух ДП задается на плюккеровой поляре, детерминируемой внешним ее полюсом  $P$ , для позиции которого формулируются условия, выполняемые в переборной схеме согласно свойствам принадлежности  $P$  *оси* симметрии  $o$  либо хорде, проходящей через искомый *центр*  $o$  (для случаев *радиальной* либо *ротационной* симметрии нечетного индекса). Сходным образом, ТЧ с узлом  $c$  используются при поиске позиций проективно симметричных пар точек контура  $o$ , удовлетворяющих при переборе вершин  $o$  тем или иным соотношениям, справедливым для *центральной* (двух родов) либо *осевой* структуры  $o$ .

**Ключевые слова:** овал, центр и ось симметрии, плюккеровы полюс и поляра, дуальные пары, гармонический вурф, вурф-функция, проективно инвариантное W-отображение, чевиана

DOI: 10.31857/S0235009221010054

### ВВЕДЕНИЕ

В данной статье описаны и на материале компьютерных реализаций обсуждены новые аспекты (сценарии задач, методы и численные схемы их решения) развития темы, отраженной в цикле авторских работ по опознанию овальной фигуры по плоской центральной ее проекции инвариантно к группе дробно линейных (иначе – *проективных*) преобразований плоского контура фигуры в 3D пространстве. Объект этого объемного исследования – кривые семейства *овалов* ( $o$ ) – плоские гладкозамкнутые фигуры (не предполагающие формул аналитического описания, единых для семейства  $o$ , при том не имеющие опорных элементов контура  $o$ , традиционно используемых в распознавании фигур по особенностям их геометрии, – наподобие точек излома, перегиба, спрямления, двойного касания и проч.).

С учетом этих соображений оказываются понятными трудности, возникающие при попытках получить помехоустойчивое описание  $o$ , не зави-

сящее от ракурса оптической регистрации  $o$  технической системой распознавания: исключительно *дифференциальные* методы анализа кривой, обеспечивающие ее инвариантное описание (каковые уже давно предложены теорией плоских кривых (Картан, 1933)), не пригодны для дискретных сеток входного описания  $o$  – в силу точностных требований к численной оценке локальных производных высокого порядка у “поточечно” описываемой кривой, каковые абсолютно нереализуемы практически (при любых технических возможных характеристиках камер). По вышеупомянутым причинам для инвариантной (и не затратной, как это, в принципе, реализуемо полнопереборными методами для дискретно заданной кривой) репрезентации  $o$  необходимо получить какие-то дополнительные данные о его структуре. Как показано нами ранее, ресурсно экономные методы обработки фигур этого семейства возможны в случаях задания  $o$  совместно с *линейным элементом* (точкой либо прямой произвольной ориентации относительно заданной фи-

гуры (Николаев, 2011; 2019)) в плоскости кривой. Если же про  $\mathbf{o}$  априори известно, что фигуре присущи свойства *симметрии*, то подобными дополнительными атрибутами ее описания могут служить элементы симметрии (ЭС) того или иного типа: пересекающая  $\mathbf{o}$  *прямая*, задающая *ось  $a$* , – в аксиально симметричном случае; внутренняя либо внешняя *точка* – при наличии *центра* (с локализацией в поле  $\mathbf{o}$ , если подразумевается тип неявно *радиальной* либо “ротационной” симметрии) или же позиция плюккерова полюса (снаружи от  $\mathbf{o}$ , в качестве поляр, представляющей ось  $a$ ). Методы и эффективные алгоритмы детекции ЭС (полного набора вариантов) разработаны, численно промоделированы и описаны (Николаев, 2014; 2016). В статье, предлагаемой вниманию читателей, рассмотрены новые подходы к задаче поиска ЭС, что можно считать целесообразным не только из соображений “обогащения базы решений”, но и с позиций технического их уровня: обсуждаемые далее процедуры по асимптотике алгоритмической сложности не уступают самым быстрым схемам – из числа ранее разработанных.

Развитые технологии обработки изображений приобрели ныне статус дисциплины с мощной процедурной базой: с методами обнаружения, подчеркивания и сглаживания границ, в силу чего в рамках этой работы нет необходимости в обсуждении приемов получения “продукта анализа” для данного исследования – в виде “контура  $\mathbf{o}$ ” (тем более, при изложении развиваемых теоретических тезисов, конкретно соотносимых с разделами проективной геометрии плоских кривых). Таким образом, *граница  $\mathbf{o}$* , с ее *инвариантными* геометрическими характеристиками, и фигурирует в качестве “объекта автоматического анализа в практической задаче по его опознанию/классификации”. Далее нас будут интересовать численно реализуемые подходы (устойчиво воспроизводимые особенности модельных тестов) в соотношении входного задания  $\mathbf{o}$ , представляющего границу фигуры совокупностью ее *вершин* “оцифровки”, с теми способами дискретной обработки  $\mathbf{o}$ , что в итоге должны дать *инвариантное* его описание, тем самым обеспечивая возможность успешно классифицировать разнообразие гладкие фигуры, относя их к *проективно эквивалентным* выборкам, либо формируя “*эталонное описание*”  $\mathbf{o}$  – для последующих технических нужд (практических задач автономного распознавания объектов).

Ранее показано (Николаев, 2016; 2017), что у овалов с *неявной* симметрией всех возможных трех ее разновидностей (центральной=радиальной, осевой, “ротационной”) произведенная безошибочно локализация сета ЭС достаточна для получения проективно инвариантного описания каждого такого  $\mathbf{o}$ , в любой из удобных форм ре-

презентации: в виде проекции на эталонный 4-вершинник; представленной гладкозамкнутой кривой 2D вурф-отображения либо посредством малоразмерного циклического графа дескриптора  $\mathbf{o}$ . Как и в предшествующих статьях цикла, под неявной формой представительства ЭС будут подразумеваться закономерности их проявления в проективной форме, не совпадающей с вариантами поведения ЭС в рамках декартовой геометрии (где *осевую* симметрию можно описать правилом “хорды, перпендикулярные *оси*, делятся ею пополам”, а *радиальную* – задать через свойство: “хорды, идущие через *центр*, разделяются им на равные части”). В *проективной* геометрии неопределимы ни “перпендикулярность”, ни операция деления отрезка пополам, поэтому методы поиска ЭС, опирающиеся на *проективно инвариантные* их признаки, будут эффективны в широком диапазоне смены “ракурсов регистрации”  $\mathbf{o}$ , в математической модели следуя законом лучевой оптики для камеры-обскуры. Прозрачно и утверждение, что процедуры, годные для вариантов трансформации  $\mathbf{o}$  проективным преобразованием плоскости в 3D декартовом пространстве, не утратят эффективности в случае *ортогонального* ракурса  $\mathbf{o}$  (при котором свойства “деления хорд пополам” будут неукоснительно выполняться). Эту уникально простую разновидность проявления свойств симметрии  $\mathbf{o}$  будем далее именовать его *ортоформой*. Нет причин останавливаться на деталях вычисления любой из выше перечисленных структур инвариантного описания  $\mathbf{o}$  с симметриями, не принципиальных для основной задачи – методов детекции ЭС разных типов ее представительства, привлекающих для решения этой задачи две альтернативные идеи. “Опорные элементы” таковых – *точка* и *отрезок* на плоскости  $\mathbf{o}$  – соответствуют схемам вычисления проективно инвариантных “дуальных пар” (ДП) точек и приемам привлечения столь же стабильных “триад чевиан” (ТЧ). Опишем кратко эволюцию идей.

Анализ данных теоретического плана, полученных для объекта  $\mathbf{o}$  в последние годы (Балицкий и др., 2017, **теорема 1**; Савчик, Николаев, 2018, **теорема 2**), в сочетании с подробно изученными особенностями введенных нами криволинейных поляр (двух типов) позволил развить новые подходы в задаче поиска проективно стабильных элементов  $\mathbf{o}$ , добавив очередные разновидности инвариантных *точек* и *прямых*. Ими стали сеты ДП и треугольные композиции отрезков – структуры ТЧ. Минимальный набор и порядок локализации ДП на прямой  $L$ , внешней для  $\mathbf{o}$ , декларирует **теорема 1**. Опора на нее обеспечила построение *универсальных* процедур проективно инвариантного описания композиции “ $\mathbf{o} + L$ ”, являющейся зафиксированным внешним дополнением  $\mathbf{o}$  прямой  $L$  (произвольной

ориентации), не касающейся контура фигуры. Вторую категорию новых структурных элементов – композицию ТЧ – komponует описанный вокруг  $o$  треугольник  $t$ , в котором три отрезка, соединяющие вершины  $t_i$  с точками касания  $k$   $o$  (в планиметрии называемые *чевианами*) связаны необходимым условием пересечения в одной точке.

Реализованные схемы вычисления проективно инвариантных функций, задаваемых *сложным отношением* квартета точек прямой (иначе – вурф-функций) на криволинейных полярах (типа  $T$  и  $H$ ) связали характерные особенности *эллиптических* (ЭТ, порождаемых в пересечениях  $T$ - и  $H$ -поляр) и ДП точек, ранее предполагавшихся подчиняющимися независимым закономерностям рода *необходимых признаков* их существования. Новый подход с объединением вычисления ЭТ и ДП оказался весьма плодотворным, дав в итоге “эмпирически (до настоящего времени) справедливую”, в качестве обобщения **теоремы 1**, (при отсутствии контрпримера по совокупным данным модельных тестов) правомерность привлечения поляр  $T$  и  $H$  в качестве *носителя* ДП, с той же оценкой в виде минимального их количества (в две ДП, для поляры того и другого типа), и той же особенностью их “цепного” (закон чередования точек пары) расположения на носителе.

По ходу разворачиваемой эволюции подходов к анализу  $o$  целесообразно уточнить, что источником идей для привлечения поляр  $T$  и  $H$ , а также и ДП, стала хорошо известная “теорема взаимности” Плюккера (о симметричной полюс-полярной структуре для *коник*, – кривых второго порядка, являющихся «вырожденным подсемейством» для  $o$  (Акимова и др., 2014)). Теорема была декомпозирована: позиционные *гармонические* свойства задали структуру  $H$ -поляры, инвариантные *тангенциальные* особенности определили правила для формирования  $T$ -поляры, а сам характер симметричных отношений у пар плюккеровых полюсов и поляр (последние – *прямолинейны*, а внешний полюс  $P$  проективно однозначно задает для  $o$  поляр  $p$  по инцидентности двум точкам прикосновения касательных к нему из  $P$ ), скорректированный в соответствии с требованиями для  $o$  общего вида, определил необходимые условия наличия композиции ДП. В отрыве от свойств принадлежности некому фиксированному носителю (внешней прямой  $L$  или же сформированной  $H$ -поляре) эти правила могут быть заявлены в форме, не уточняющей инцидентность двух внешних плюккеровых полюсов  $P_1$  и  $P_2$  и не меняющей детерминизма в расположении их поляр  $p_1$  и  $p_2$  при любой проективной трансформации данной композиции, а именно: “поляр  $p_2$  проходит через  $P_1$ , при том что  $P_2$  принадлежит  $p_1$ ”. Подобное задание композиции для *одиночной* ДП наводит на мысль о возможности поиска для

$P_1$  дуальных полюсов  $P_2$  и  $P_3$  по разные терминальные стороны от концов хорды, которой одновременно инцидентны поляры  $p_2$  и  $p_3$ . Схема вычисления этой новой дуальной композиции, где триада внешних полюсов образует две ДП вида  $P_1..P_2$  и  $P_1..P_3$ , успешно протестирована на моделях и описана в работе (Николаев, 2020). Каким образом новый подход к ДП помогает оценить ЭС в сценариях “для  $o$  с симметриями того или иного типа”, рассмотрено в последующих разделах, а завершающую тему введения посвятим краткому комментарию к “идеологии ТЧ” и ее эволюции в задаче поиска ЭС у  $o$  с неявной симметрией разных типов.

В начале введения упомянутая **теорема 2** декларирует существование не менее двух проективно инвариантных композиций ТЧ в сценах, где у  $o$  *фиксирована* пара точек контура (т.е. третья точка касания формируемой для  $o$  ТЧ, вычисляемая по критерию общего для них пересечения, имеет не менее двух позиционных решений), побудили к модельным экспериментам, подтверждающим гипотезу о возможности “упорядочить” два допустимых решения для ТЧ, что обеспечило бы шанс *целенаправленно* выбирать из них единственное по некому однозначному критерию (“искомая третья позиция принадлежит точке касания ТЧ *либо* контуру  $o$  со стороны противоположной вершины  $t_3$ ”). Численные результаты на старте исследования этой гипотезы приведены в статье (Николаев, 2020; см. рис. 11). Таким образом, “на эмпирическом материале сделанное уточнение=обобщение **теоремы 2**” обеспечило для задачи, стоящей перед нами в данной работе, процедурные подходы согласно идее: “для случайным образом выбранной точки на контуре  $o$  в ходе перебора его вершин – найти композицию ТЧ, которая удовлетворит априори известным признакам ЭС (с данным типом симметрии, что и станет критерием выбора искомой ТЧ на языке условий для неких вурф-функций) для второй и третьей точек, инцидентных ЭС”.

Подведем итог предварительного рассмотрения актуальной задачи. Общий прием при использовании структур ДП и ТЧ для поиска разнообразных ЭС состоит в задании критерия фиксации искомого позиционного решения в переборной (по вершинам  $o$ ) схеме “со случайной начальной вершиной  $o$ ” и варьируемыми координатами точек (из числа ДП *либо* ТЧ), удовлетворяющих конкретным условиям их инцидентности детектируемому ЭС.

Прежде чем перейти к рассмотрению ряда альтернативных методов поиска ЭС с привлечением структур ДП и ТЧ, уведомим читателя о том, что данный текст адресуетя всем, интересующимся проблемами автоматического анализа формы (не требуя навыков профессиональной подготовки в

этой сфере). Для уяснения существа излагаемых проблем и показанных модельных результатов достаточно ориентироваться в поле представлений естественно-научного плана. Авторские тезисы донесены здесь в образной геометрической форме. Исчерпывающее понимание смысла приводимых далее нотаций, схем и приемов обработки не обязательно для знакомства с содержательной логикой обсуждаемых идей. Текст иллюстрирован примерами результатов компьютерного моделирования (для разных сценариев ЭС), снабженных комментариями, что может удовлетворить неспециалистов.

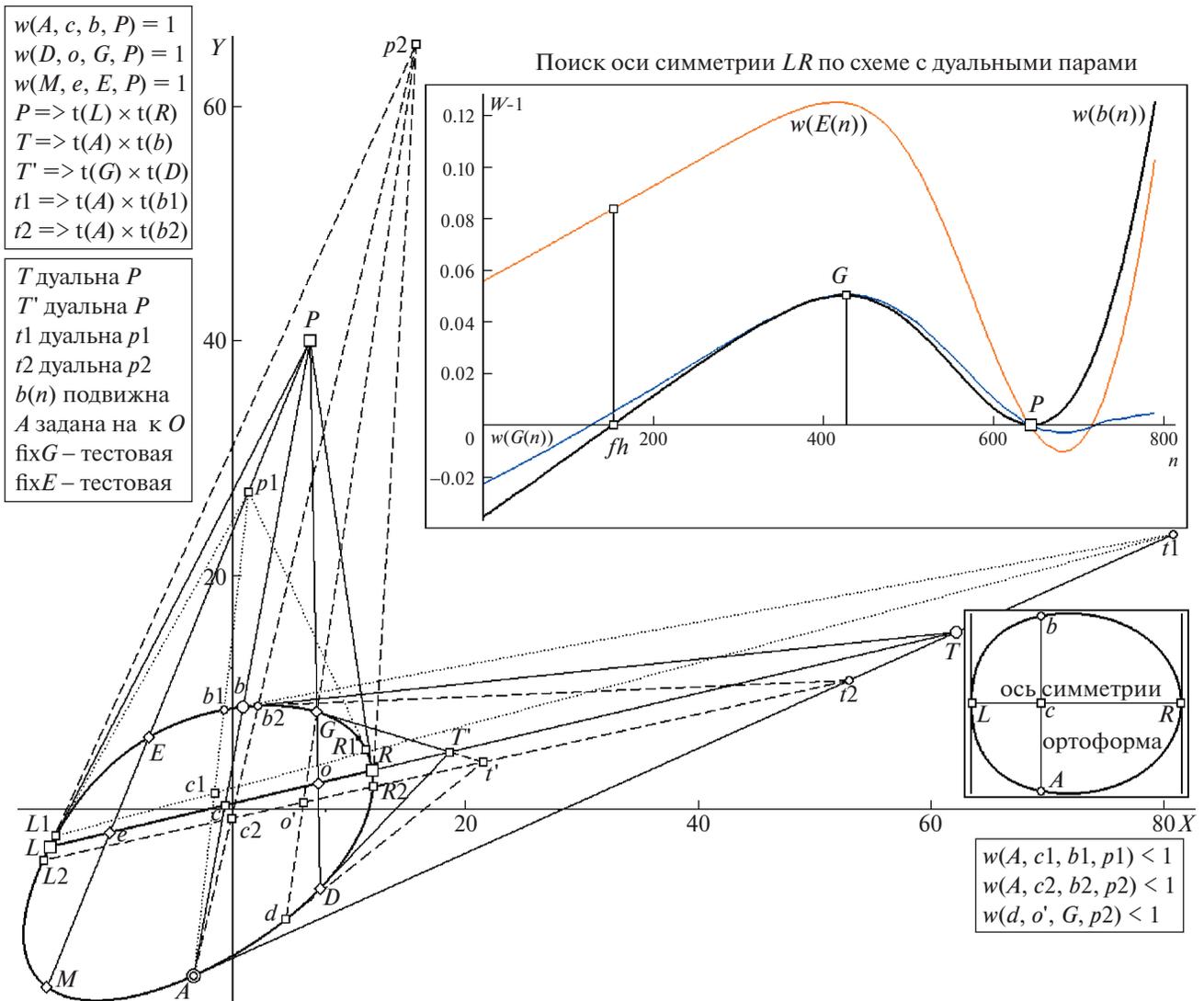
## 1. МЕТОД ПРИВЛЕЧЕНИЯ ДП В ЗАДАЧЕ ПОИСКА НЕЯВНОЙ ОСИ СИММЕТРИИ $\mathbf{O}$

Коснемся детальнее истории с генезисом ДП. Понятие “дуальности” (синоним – *двойственность*) привнесено из наследия одного из творцов проективной геометрии – Ю. Плюккера, с его теорией полюс-полярного соответствия для *коник* (известным примером которых является эллипс) и фундаментальной “теоремой взаимности” для них (Глаголев, 1963; Моденов, 1969). Тезисы теоремы (метрически инвариантные свойства композиций полюсов и вершин, индентных полярам, проявляющиеся в виде *гармонизма* отношений, и дифференциально-тангенциальные особенности, присущие касательным к конике) и побудили автора к введению в аппарат анализа  $\mathbf{O}$  двух независимых инструментов: “на языке *касательных* формируемую”  $T$ -полярю и подчиняющуюся законам *гармонических отношений*  $H$ -полярю. Зеркальная симметрия положений внутренних и внешних *полюса* и *поляры* (напомним: плюккерова *прямолинейная поляр* соответствует прямой, проходящей через точки касания к эллипсу из внешнего *полюса*; в силу подобной связи их позиции взаимно однозначны) в соответствии с возможностью их сепаратного использования для описания свойств  $\mathbf{O}$  посредством привлечения поляр  $T$  и  $H$  рассмотрена в работе (Акимова и др., 2014), где показано, что для диспозиции “внешний полюс, внутренняя поляр” их однозначная связь для  $\mathbf{O}$  общего вида неизменна при его проективных трансформациях, но по полюсу *внутреннего* положения вычислить для  $\mathbf{O}$  его плюккерovu полярю невозможно (так как формализм генерации кривой, верный для эллипса, к семейству  $\mathbf{O}$  неприменим). Однако из деклараций теоремы взаимности удастся вычленить “особый тезис дуальности отношений”, где гарантированная для коник *всеобщность* связи позиций двух полюсов и двух плюккерových поляр в случае с  $\mathbf{O}$  редуцируется к связи уже *уникальной*: по некоторой позиции  $\text{ext}P1$  для  $\mathbf{O}$  можно искать такую  $\text{ext}P2$ , что поляр  $p1$  пройдет через  $\text{ext}P2$ , при том, что полюс  $\text{ext}P1$  окажется принадлежащим

полярю  $p2$ . Эти два полюса произвольного внешнего расположения и стали исходным носителем дуальных свойств в **теореме 1**, заявляющей, что на прямой  $\text{ext}L$  произвольного расположения по отношению ко всякому  $\mathbf{O}$  всегда существует не менее двух проективно инвариантных ДП. Для задачи, стоящей перед нами, совершенно не важна коллинеарность всего квартета (двух ДП), достаточен успех построения *одной* ДП с требуемыми *гармоническими* свойствами, а потому  $\text{ext}L$  из разряда “инициирующих причин композиции” нивелируется к “неизбежным и ненужным следствиям” структуры ДП, найденной исключительно по критерию двойственности.

Для внятности описываемых далее процедурных решений, на некоторой стадии вычисления (при анализе вурф-функций) использующих понятие “гармонизма”, приведем “формулу *гармонического отношения*”, в качестве важнейшего частного выражения для фундаментального проективного инварианта, здесь именуемого “вурф” (в современных математических работах его чаще называют “*сложным* отношением четверки точек на прямой”). Для простоты дефиниций ограничимся заданием вурфа через длины отрезков, на которые прямую разбивает квартет ее точек (т.е. дадим формулу вычисления *модуля* вурфа, где *знак* при численном инварианте, формируемом из *ориентированных* отрезков, нами проигнорирован). Обозначив через  $a$ ,  $b$  и  $c$  длины отрезков в последовательной их маркировке, запишем выражение вурфа  $w$  в виде  $w[a, b, c] \equiv a^*c/((a + b + c)^*b)$ , что и дает всегда “безразмерное” *число* при любой размерности длин. *Гармоническим* (в этой форме задания) называется вурф, следующий условию  $w[a, b, c] = 1$ , что реализуется, к примеру, радикально отличающимися композициями  $w[3, 1, 2]$  и  $w[x, x, \infty]$  с близкими и бесконечно далекой позицией одной из точек квартета (ее называют *несобственной*). В нашем случае «прыжки из бесконечности» в окрестность  $\mathbf{O}$  будут характерной особенностью сцен при переходе от явного задания свойств симметрии (ортоформой) к неявному их выражению (при технических реализациях процедуры поиска ЭС – в итоге смены оптического ракурса регистрации  $\mathbf{O}$  от ортогональной к произвольной неортогональной). Перейдем к описанию модельных (компьютерных) процедур, форма  $\mathbf{O}$  для которых задавалась непосредственно цепью вершин аппроксимации с управляемой плотностью представительства на контуре).

Рассмотрим аксиально симметричный  $\mathbf{O}$  в неортогональной проекции, для которого требуется найти положение неявной оси  $L-R$ , привлекаая аппарат поиска ДП в переборном процессе ее *детекции*, идущей с вычислением вурф-функций, проверяемых на исполнение условий гармонизма для искомой диспозиции всех элементов варьируемой конфигурации (четверок точек на лучах



**Рис. 1.** Метод детекции образа оси симметрии с привлечением композиции одиночной ДП (дуальной пары  $P, T$ ) и подход к выбраковке ложных решений – с помощью контрольных  $W$ -функций  $w(E(n))$  и  $w(G(n))$  – в комплекте с основной  $w(b(n))$  (на врезке справа сверху). Остальные пояснения в тексте.

перебираемых направлений, касательных к контуру с позициями их пересечений и проч.; рис. 1). Для большей ясности идеи поиска справа внизу на малой врезке показана ортоформа  $o$ . На ее примере наглядно демонстрируется, что у произвольно выбранной позиции  $A$  всегда найдется симметричная ей точка  $b$ , при том что хорду  $A-b$  ось поделит на две равные части, а сама хорда всегда будет параллельна паре касательных у терминальных точек оси – в  $L$  и  $R$ . На языке *проективных* (а не декартовых особенностей ортоформы) это условие трансформируется к виду “хорда и пара касательных пересекутся в несобственной точке  $P$ ”, что при переходе к неявной форме задания  $o$  с его осью можно выразить заменой соотношения  $w[x, x, \infty] \equiv w(A, c, b, P) = 1$  ( $x = A - c = c - b$ , а  $|\infty| \equiv b - P'$ ; при этом вторая форма нотации вурфа

“через квартет коллинеарных точек” использует круглые скобки вместо квадратных, избранных для его задания “в отрезках”) на запись  $w(A, c, b, P) = 1$ , теперь уже адекватной для полюса  $P$  (детерминированного плюккеровой полярой  $L-R$ ) в его качестве позиции пересечения луча  $A-P$  с касательными  $t(L)$  и  $t(R)$  (что отражено на врезке рис. 1 сверху слева структурной формулой “ $P \Rightarrow t(L) \times t(R)$ ”; знак  $\times$  имеет смысл “точка пересечения”, а запись  $t(A)$  истолковывается как “касательная в точке  $A$ ”). Итог именно этого «вброса плюккерова полюса  $P'$  из бесконечности в окрестность  $o$ », совершающийся при переходе от представления  $o$  ортоформой к неявным проявлениям для ЭС, демонстрирует общий план  $o$  на поле рис. 1 слева. Прочие формулы для  $T, P', t1, t2$ , помогаая понять их генезис, также размещены на врезке сверху слева.

До рассмотрения процедуры поиска оси  $L-R$  кратко коснемся финальных этапов (не обсуждаемых в рамках “укороченной” постановки задачи) инвариантного представления  $\mathbf{o}$ , достаточных для целей распознавания=классификации. Понятно, что любая ДП задает (присущий лишь ей) квартет стабильных точек на  $\mathbf{o}$  (в нашем случае это четверка  $A, L, b, R$ ). Слово *квартет* тут ключевое, поскольку понятным образом выводит на конечную цель манипуляций с проективно инвариантными точками: для решения задачи опознавания фигур семейства  $\mathbf{o}$  необходимо получить образ  $\mathbf{o}$ , неизменный при сменах оптического ракурса его регистрации, создав *эталон*, единый для класса проективно эквивалентных  $\mathbf{o}$ . Одной из адекватных форм такой репрезентации  $\mathbf{o}$  нами заявлена операция проецирования входного  $\mathbf{o}$  на некоторый стандартный 4-вершинник (например, квадрат фиксированного расположения), что просто и однозначно реализуется решением линейной системы восьми уравнений (Николаев, 2011), так как позиции некой стабильной четверки вершин контура  $\mathbf{o}$  всегда возможно трансформировать в диспозицию эталонного 4-вершинника, совершив проективное преобразование плоскости исходного  $\mathbf{o}$  (его задают *восемь* неизвестных независимых коэффициентов, доставляемых решением системы) перепроецированием на квадрат эталона – при условии совмещения найденной стабильной четверки с вершинами эталона. Идея проецирования на вершины эталона, скорее всего, ясна. Однако наличный квартет  $A, L, b, R$  не годится на роль однозначно “стабильной четверки”, так как позиция  $A$  выбрана на контуре  $\mathbf{o}$  случайно. Указанное препятствие легко преодолимо: нами описан (Николаев, 2017) алгоритм обнаружения *уникальной* точки  $C$  на стабильной хорде  $L-R$ , использующий некоторое экстремальное условие для вурфа на “скользящей касательной в  $b(i)$ ” (по  $i$  идет перебор вершин  $\mathbf{o}$ ), которое для луча  $P-C$  в пересечениях с контуром  $\mathbf{o}$  обеспечивает однозначную оценку координат уникальной пары  $B, A'$  (на рис. 1 эта пара не показана). В итоге, для дальнейшего эталонирования  $\mathbf{o}$  будет получен квартет  $\{A', L, B, R\}$ . Вернемся к идее поиска неявной оси и требуемым шагам ее реализации – в переборном процессе детекции вершин  $L$  и  $R$ , задающих позицию оси симметрии  $\mathbf{o}$ .

Случай осевой симметрии вносит коррективу в правило взаимной однозначности отношений для “фигурантов” ДП. Действительно, точке  $T$ , принадлежащей продолжению хорды  $L-R$  (т.е. искомой оси), однозначно дуальна позиция плюккерова полюса  $P$  (рис. 1). Но и у  $T'$ , с ее полярной  $D-G$ , ДП для нее окажется та же самая  $P$ . Вывод: некой позиции на внешних продолжениях хорды  $L-R$  дуальна  $P$ , однозначно задающая искомую ось, тогда как “в обратном прочтении” дуализм проявляется в неоднозначном виде:

“уникальному полюсу  $P$  двойственно линейное семейство позиций внешних фрагментов оси”. Подобная асимметрия отношений, не мешая организации процедуры детекции, даже помогает найти единственно верное решение, создавая возможность проверок гармоничности вурфов на лучах из  $P$ , тем самым и обеспечивая отбраковку ложных решений. Поясним подробнее.

Как указано на врезках рис. 1, лучом из случайным образом фиксированной точки  $A$  производится дискретное сканирование вершин  $\mathbf{o}$ , где “скользящая” (перебираемая по номеру  $n$  вершин аппроксимации  $\mathbf{o}$ ) точка  $b(n)$  детерминирует пошагово формирование поляра  $A-b(n)$ , для каждой из которых вычисляются позиции ее “текущей” ДП – в виде полюсов  $t(n)$  и  $p(n)$  совместно с полярной  $L(n)-R(n)$  для неподвижной  $A$ . На рис. 1 показаны положения  $b_1$  и  $b_2$ , обрамляющие искомую позицию  $b$ , с размеченными полярами  $L_1-R_1$  и  $L_2-R_2$  для них и их полюсами в виде двух ДП:  $p_1..t_1$  и  $p_2..t_2$ . Для искомой диспозиции с хордой оси  $L-R$  помечены (большими “кружком” и “квадратом”) дуальные полюса  $T$  и  $P$ . И, поскольку на каждом шаге переборного процесса можно вычислить точку пересечения  $c(n)$  дуальных поляр, то появляется возможность сформировать основную вурф-функцию процедуры по дискретным оценкам вурфа  $w(A, c(n), b(n), p(n))$  (показана вверху справа на врезке рис. 1, помеченная как “ $w(b(n))$ ”). На шаге максимально возможного (что зависит от плотности реализованной аппроксимации вершин) совпадения  $b(n)$  с  $b$  оценка  $w(b(n))$  по критерию  $w(b) = 1$  (признак гармоничности вурфа) будет сигналом завершения поиска, в итоге будут выделены все адекватные компоненты композиции: полюса  $P, T$  и хорда=ось  $L-R$ . Если опираться единственно на ход функции  $w(b(n))$ , то адекватность решения будет зависеть от правильности выбора между двумя вариантами – истинным (метка “большой квадрат” у литеры  $P$ , врезка справа вверху) и ложным (позиция “фальшь-гармонизм  $fh$ ”). Функция  $w(b(n)) = 1$  для “ $P$ ” имеет минимум, а в “ $fh$ ” пересекает оценку  $w(b) = 1 = 0$ . На контуре меткой “малый зачерненный квадрат” (между  $R_1$  и  $G$ ) показана позиция для  $b(n)$ , где основная вурф-функция (далее будем использовать сокращенную форму  $W$ -функция) предлагает ложное решение “ $fh$ ”. Возникла ситуация альтернативы, где оба варианта – равноправные кандидаты на целевую композицию. Выход из тупика требует независимую проверку=контроль, что и возлагается на случайную пару  $G, E$ .

Проверка идет параллельно на каждом шаге перебора, не требуя каких-либо оценок дуализма. Из текущего полюса  $p(n)$  вычисляются два вурфа в направлении  $G$  и  $E$ . На рис. 1 показано, что для  $G$  из “неверного” полюса  $p_2$  формируется оценка  $w(d, o', G, p_2) < 1$  (на врезке справа внизу приведе-

но это отклонение от гармонического значения), тогда как луч “из  $P$  на  $G$ ” дает гармоническую оценку  $w(D, o, G, P) = 1$  (она помещена на верхней врезке слева). Эта проверка показывает, что позиция  $G$  удовлетворяет гипотезе о полюсе оси (на большой врезке  $W$ -функция  $w(G(n))$  принимает единичное значение для того же номера  $n$  вершины, что и основная  $w(b(n))$ , при том, что у вершины с меткой “fh” не равна 1 (хотя и близка к гармонической). Для большей уверенности в правильности отбраковки номера при “fh” производится вторая проверка по  $W$ -функции на луче  $p(n)$ - $E$ . Она подтверждает истинность выбора  $P$  в качестве полюса оси, “безкомпромиссно отвергая версию решения для fh” ( $W$ -функция  $w(E(n))$  по этому номеру выдает оценку, весьма отличную от 1, что и показывает ордината  $w(E(n))$  у “малого квадрата”). Структурные формулы, фиксирующие условие гармонизма для искомого конфигурации элементов на лучах из  $P$  в направлении на “рандомно контрольные”,  $G$  и  $E$  приведены слева на верхней врезке рис. 1.

Как себя ведут вурф-оценки по ходу пошагового формирования позиций ДП (т.е. как для “подвижного” луча  $A$ - $b(n)$  в роли плюккеровой поляры, варьируемого в диапазоне номеров от  $R$  до  $L$ , вычисляются его дуальная поляра  $L(n)$ - $R(n)$  и ДП полюсов  $f(n)$  и  $p(i)$ ), помогает уяснить рис. 2. Его поле изображает картину связей плюккерových элементов на шаге  $n$ , соответствующем направлению луча сканирования из  $A$  на вершину  $R$ , каковая подразумевается в обозначении  $b(n)$ . Этот луч детерминирует полюс  $f(n)$ , который в свою очередь задает его ДП в виде  $p(i)$ , – с полярой  $L(i)$ - $R(i)$  (и узлом  $c(i)$  в пересечении поляра), весьма позиционно далекой от искомого положения хорды  $L$ - $R$  в качестве «образа оси». Основной вурф  $w(p(i), A, c(i), b(i))$ , также как и пара “проверочных” –  $w(p(i), d(i), o(i), G)$ ,  $w(p(i), k(i), e(i), E)$  характеризуют ситуацию, как отличную от гармонической (эти оценки вынесены на малую врезку справа). Дополнительную информацию привносит показ связи между текущим номером “скользящей” вершины  $b(n)$  и номером концевой точки  $L(i)$  луча  $f(n)$ - $L(i)$  (кривая на большой врезке справа внизу). Функциональная зависимость номеров такова, что номер  $b(n)$  (метка “большой квадрат”), фиксирующий позицию  $P$  (проективно симметричную  $A$ ), не уникален для “правильной”  $L(i)$ , каковая образует шаблон ДП и для номера при литере “р”, фиксирующего ложное решение. При этом номер для вершины  $inv$  является точкой инверсии направления перебора номеров для  $L(i)$  при монотонном росте номеров у  $b(n)$ . Таким образом, проверки шаблонов ДП по лучам на  $G$  и  $E$  необходимы.

На материале проведенного недетализированного описания процесса вычислений, формирующих ДП для каждой позиции  $b(n)$ , можно сле-

дательный (предварительного характера) вывод: последовательно по номеру  $n$  формируемые списки оценок вурфов, которые по завершении процесса должны образовать массивы  $W$ -функций (основной и пары контрольных) оперируют пошаговыми данными, где изменяемому положению  $b(n)$  ставится в однозначное соответствие им детерминируемая композиция ДП. Но сама эта композиция не может быть вычислена (по “априорной исчерпывающей формуле”), как функция координат  $b(n)$ , ее требуется “построить”, соотносясь с дуальными принципами отношений поляра. Идея построения проста: для поляры  $A$ - $b(n)$ , однозначно задающей полюс  $f(n)$ , требуется выбрать такое положение поляры  $L(i)$ - $R(i)$  (рис. 2), чтобы ее полюс  $p(i)$  стал инцидентен лучу  $A$ - $b(n)$ . Следовательно, без независимого перебора по  $i$  для  $L(i)$  (либо для  $R(i)$ , что “для идеи” безразлично, и выбирается из соображений оптимума по точности для операции “ $p(i)$  – ближайшая к  $A$ - $b(n)$ ”) не обойтись, и это означает, что в процедуре должен быть продуман и программно реализован поиск дуального положения поляры  $L(i)$ - $R(i)$ . Вывод: комбинаторный процесс получения  $W$ -функций – двухуровневый (дискретные аргументы  $W$ -функций образуют ряд перебора по  $n$ , а реализация критерия дуальности для полюса  $p(n)$  требует выбора его позиции через вариации по переменной  $i$ ). Ограничимся этим комментарием функционального характера, упреждая читателя о более развернутом описании двухпараметрического перебора вершин, столь же необходимого и по той же схеме работающего, но уже на примере аппарата ТЧ (разд. 2).

Дополнительно заметим, что специфика дуальных отношений для подсемейства осесимметричных овалов такова (в том числе, в связи с неоднозначностью вариантов ДП по линии их поиска “от  $P$  к массиву  $t(n)$ ”, обсуждавшуюся выше), что “в целях экономии вычислительного ресурса” нами был выбран путь решения поставленной частной задачи несколько более простой (более “быстрый”), нежели описанный во введении в разряде новаций: метод, рассмотренный нами в данном разделе, не потребовал привлечения более громоздкой численной схемы с формированием тройственных структур ДП вида  $P1..P2, P1..P3$ , поскольку решение доставляла “минимальная” ДП ( $P1..P2$ ). Вариант тройственной организации ДП в процедуре поиска ЭС использован для случая радиальной симметрии  $o$  и будет рассмотрен далее в разд. 3. Этим комментарием завершим обсуждение подхода с привлечением аппарата ДП в целях обнаружения неявной оси  $o$ , переходя к обсуждению новых переборных методов теперь уже с использованием композиций ТЧ для решения той же обратной задачи – на компьютерных моделях аксиально симметричного  $o$ .

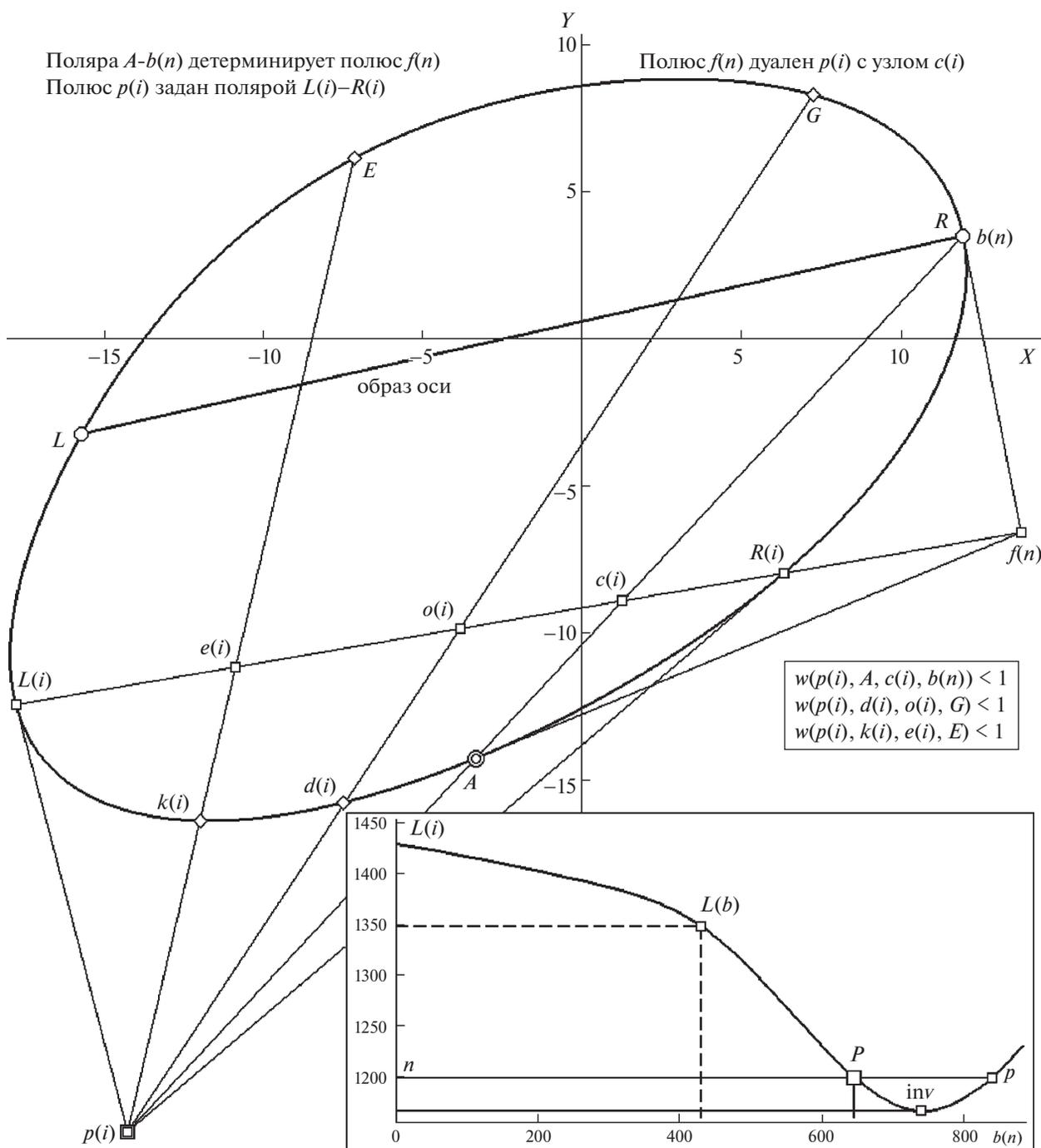


Рис. 2. Формирование ДП  $f(n).p(i)$  во внутреннем цикле  $(i)$  переборной процедуры поиска оси  $L-R$  лучом обхода из фиксированной  $A$  в  $b(n)$  (с контрольными  $E$  и  $G$ ) и демонстрация функции позиционной связи  $L(i)$  с  $b(n)$  (на врезке внизу). Остальные пояснения в тексте.

## 2. МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИЙ ТЧ В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ОСИ СИММЕТРИИ O

Объект проективно инвариантного анализа и обработки – тот же, что и в разд. 1. Не изменились ни целевая установка (поиск неявной оси), ни

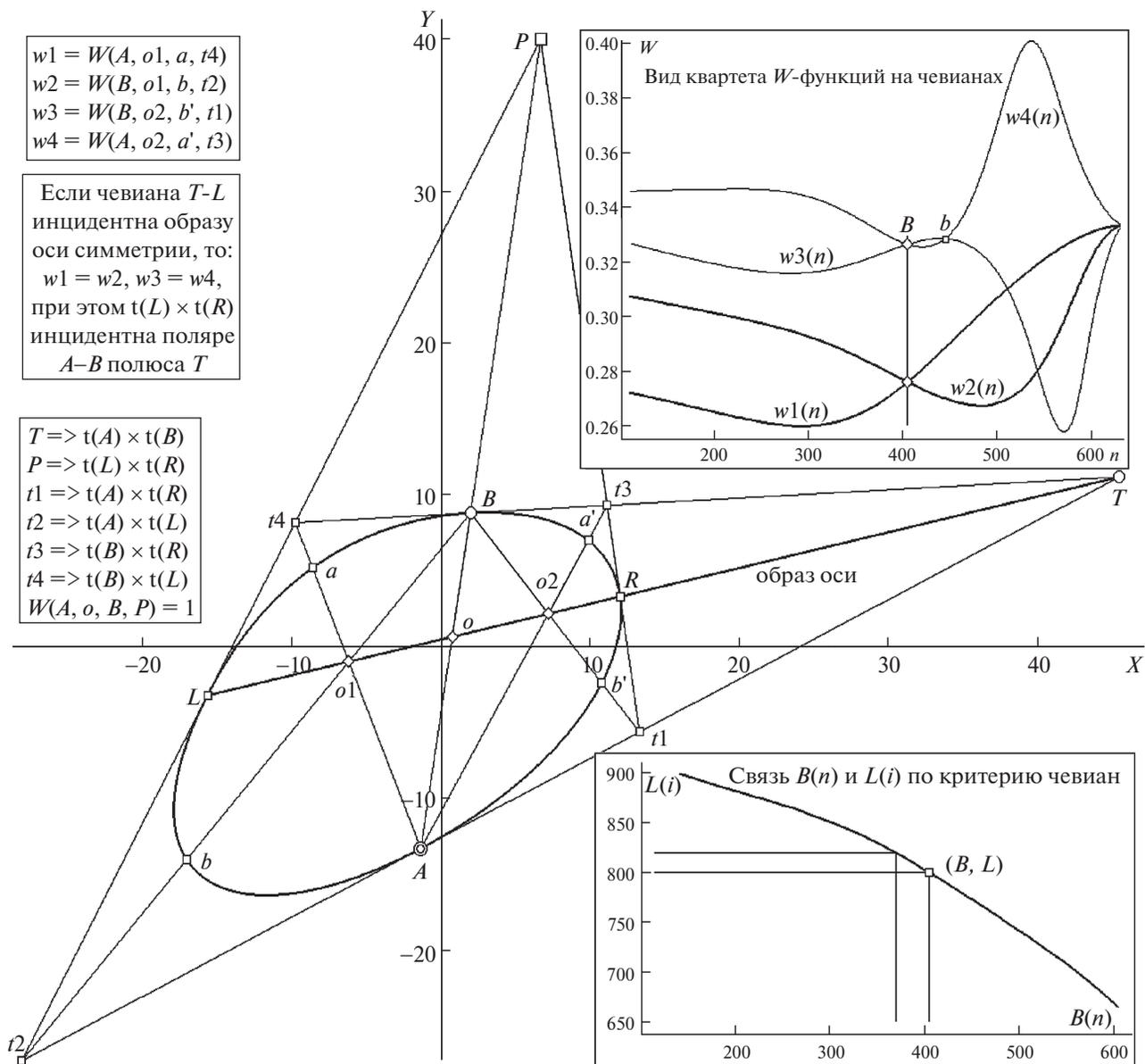
метод работы с объектом (тесты на моделях численных схем, где контур  $\sigma$  генерируется в виде замкнутой цепи вершин его аппроксимации – с регулируемой плотностью презентации и целенаправленно меняемыми “проекциями оптической регистрации”, имитируемыми сменой сетки 8 коэффициентов проективного преобразования

плоскости  $o$ ), ни концепция двухпараметрического перебора вершин  $o$  в алгоритме поиска оси. Меняется “детектирующий инструмент” поиска. Теперь миссия позиционной оценки возложена на инвариантную композицию “ТЧ”, где схема “текущих метаморфоз” ТЧ устроена по уже оправдавшему себя (на примере аппарата ДП) сценарию: последовательно (комбинаторно) переисчисляемые структуры композиций ТЧ порождают на каждом шаге процедуры коллинеарные квартеты «точек», что позволяет сформировать сет  $W$ -функций, для которых заранее определены и согласно теоретическим критериям “считываются” оценки, однозначно выявляющие целевую конфигурацию.

Еще один нюанс: для того, чтобы объемы разделов не очень сильно различались, однотипный материал перераспределен в соответствии с меняющейся акцентацией (без нежелательных потерь в его связности и ясности). В текущем – уделено больше внимания двумерному перебору вершин  $o$ , т.е. идее алгоритма, имеющего внутренний и внешний циклы (в них и идут вычисления со смежной номером вершин). В разд. 1 акцент выделил геометрические (“лучи”, хорды, касательные, гармонические вурфы) и “изографические” (ход  $W$ -функций) аспекты метода, чем закамуфлировал якобы прозрачную идею перебора. Этот важный момент, структурно общий с организацией процедуры перебора для ДП, будет обсужден здесь на примере ТЧ, “по авторским ожиданиям”, не слишком увеличивая сложность восприятия текста – с минимальным уклоном в программирование.

Перед нами – снова та же фигура  $o$  с неявной осью симметрии  $L-R$  и случайным образом фиксированной позицией  $A$  (рис. 3). Вспомогательные построения, методически иллюстрирующие подход, имеют элементами *касательные* с точками их пересечения, что на трех врезках слева комментируется: в виде структурных формул их идентификации (на нижней; в той же нотации, что и на рис. 1, 2), в стиле “словесно выраженного” критерия целевых соотношений (на средней врезке) и в специфике организации квартета вурфов, по рецептам для которых и формируется четверка основных  $W$ -функций  $\{w_1, w_2, w_3, w_4\}$  (вверху). Все вспомогательные построения соответствуют *финальной* картине поиска оси  $L-R$ : найден ее полюс  $P$ , т.е. на прямой  $P-A$  уже известно целевое положение подвижной  $B$ , следовательно, определена и позиция  $T$  согласно правилу  $T \Rightarrow t(A) \times t(B)$ . Изображенная композиция наглядно показывает, какие именно две ТЧ детерминируют искомую картину. Левая ТЧ образована чевианами  $T-L, t_4-A, t_2-B$  с узлом  $o_1$  (так мы будем называть общую точку ТЧ); правую – компонуют  $T-R, t_3-A, t_1-B$  с их узлом  $o_2$  (т.е. чевиана  $T-R$  является концевым участком  $T-L$  для

“поляры симметрии”  $L-R$ , общей этим двум ТЧ). Критерий получения целевой композиции теперь не связан с условиями *гармонизма* для квартетов вершин и пересечений, как это требовалось в работе с ДП. Их заменили проверки на попарное равенство ординат  $W$ -функций, что для целевой позиции выражается оценками  $w_{1B} = w_{2B}, w_{3B} = w_{4B}$ , где  $w_1 \equiv W(A, o_1, a, t_4)$ ,  $w_2 \equiv W(B, o_1, b, t_2)$ ,  $w_3 \equiv W(B, o_2, b', t_1)$  и  $w_4 \equiv W(A, o_2, a', t_3)$ . На каждом шаге вычисления  $W$ -функций именно новая позиция  $b(n)$  задает всю ею детерминируемую композицию ТЧ. Шаг  $n$  процедуры перебора фиксирует пару  $A, b(n)$ , в итоге из элементов формируемой ТЧ оказывается заданной *единственно*  $f(n)$  (рис. 4; в роли плюккерова полюса поляры  $A-b(n)$ , в финальной диспозиции рис. 3 – “под именем  $T$ ”). Появление остальных элементов зависит от выбора положения для вершины  $e$ , реализующего критерий *общего узла*. Требуется найти такую позицию для “подвижной вершины  $e$ ” (той, что в финале поиска получит “имя”  $L$ ), чтобы касательная  $t(e)$  (вводимая к уже имеющимся  $t(A)$  и  $t(b)$ ) “уникальным образом замкнула треугольную конструкцию” для  $o$  (он должен быть вписан в треугольник из касательных), итогом чего чевианы, соединившие вершины  $t_j$  треугольника с точками касания  $A, b$  и  $e$ , “максимально кучно сошлись бы в узле” (в идеале – пересеклись в одной точке). Следовательно, выбор вершин необходим *двойной*: для  $n$ -го шага, задавшего  $b(n)$ , требуется, варьируя вершины по  $i$ , подобрать адекватное критерию положение для  $e(i)$ . Логика “двух степеней свободы для организации шаблона (конструкции) ТЧ” обусловила требования к численной схеме: компьютерная программа поиска оси должна иметь внешний цикл, задающий координаты  $b(n)$ , и цикл внутренний (“вложенный”), путем перебора по  $i$  реализующий (согласно критерию общего узла для ТЧ) наилучшее положение для вершины  $e(i)$ . Внутренний цикл поставляет внешнему на каждом  $n$ -ом шаге сет необходимых данных для вычисления четырех вурф-квартетов  $\{w_1, w_2, w_3, w_4\}$ , из которых по завершении работы внешнего цикла оказываются скомпонованными четыре  $W$ -функции, требуемые для окончательного выбора целевой конфигурации, т.е. появления адекватных координатных оценок вершин  $L$  и  $R$ . Поведение этой четверки  $W$ -функций (с показом меткой «ромб» номера вершины для  $B$ ) демонстрирует правая (вверху) врезка на рис. 3. Для номера, безошибочно оценившего позицию  $B$ , попарные равенства значений для квартета  $W$ -функций выполнены, однако у пары  $w_3, w_4$  найдена еще одна вершина (помечена литерой “b”) с равенством вурфов, что сигнализирует (аналогично особенностям  $W$ -функций в схеме с шаблоном ДП) о критерии попарного равенства как *необходимом*, но не принадлежащем разряду *достаточных*. Этот пример демонстрирует необ-



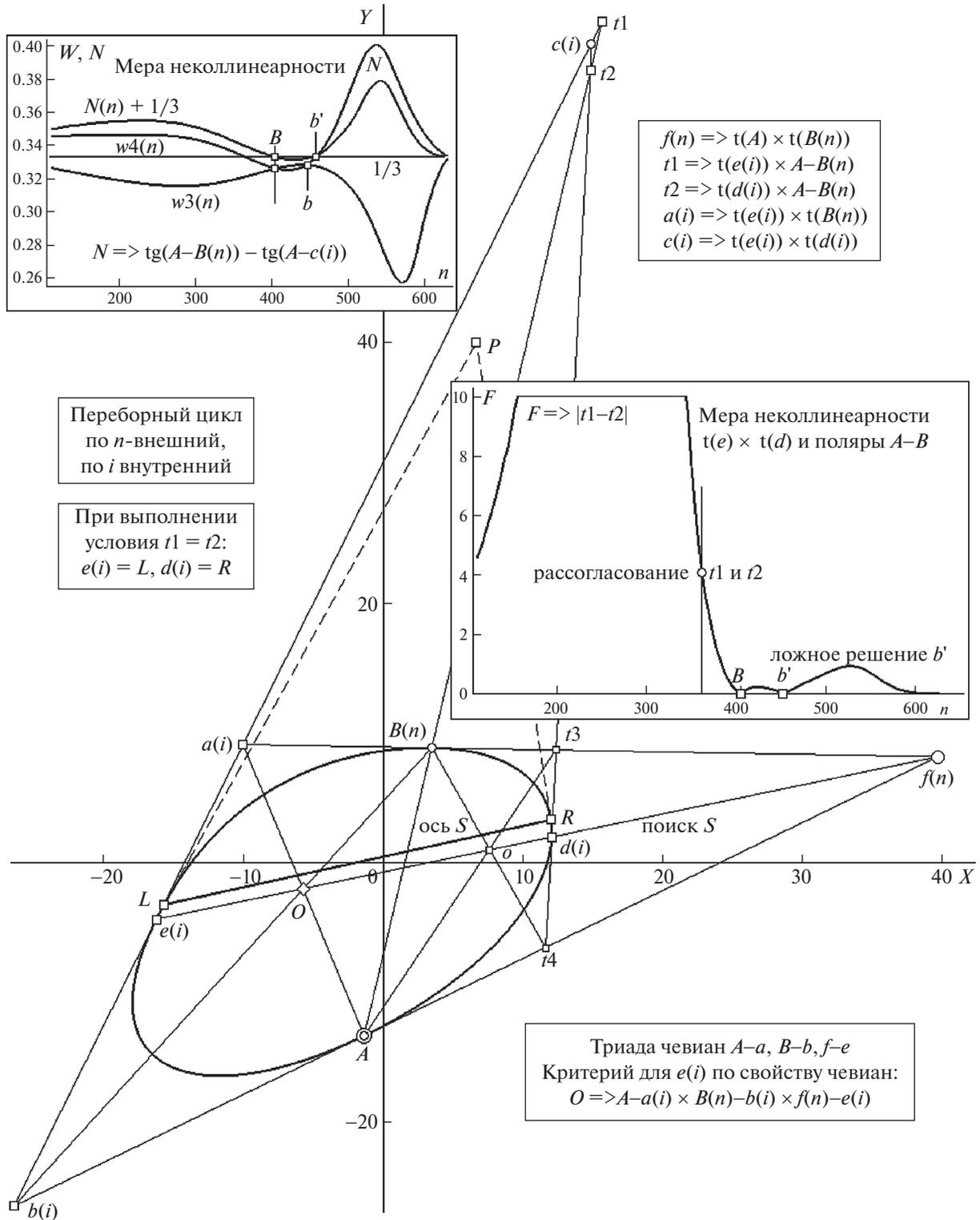
**Рис. 3.** Вид целевой композиции переборного процесса поиска оси  $L-R$  с привлечением схемы ТЧ (триад чевиан) и модель поведения  $W$ -функций  $\{w1(n) \div w4(n)\}$ , выполняющих поиск вершины  $B$  и отбраковку ложного позиционного решения  $b$  (врезка вверху справа). Показ функции связи вершин  $L(i)$  и  $B(n)$  (на врезке внизу). Остальные пояснения в тексте.

ходимость введения контрольных проверок в алгоритм.

На рис. 4 показан фиксированный (по  $n$  во внешнем цикле) шаг процедуры поиска оси  $L-R$  для “ожидаемой” позиции  $B(n)$  и ошибочных координатах для  $e(i)$  в переборе по  $i$  во вложенном цикле (на этом этапе  $e(i)$  является плохой позиционной оценкой для  $L$ ). На врезках (слева вверху и справа в середине рис. 4) дана сводка модельных тестов по ряду проверочных приемов. Учет оценок, получаемых в итоге их включения, позволяет избрать верное решение. Реализации возможных

проверок альтернативны и затратно близки, а идея – общая и чрезвычайно простая. Описав ее, перечислим кратко приемы контроля.

Идея комбинирует триаду проективно инвариантных свойств: однозначную связь плюккерových внешнего полюса  $P$  и поляры для осесимметричного  $o$ ; ненарушаемую ее особенность гармонической вурф-оценки для любого луча  $P-A$  с квартетом  $\{P, B, o, A\}$  (рис. 3) и тезис теоремы 2 об обязательном существовании шаблона ТЧ для любой пары вершин, фиксированных на контуре  $o$ . Первое свойство гарантирует для касатель-



**Рис. 4.** Демонстрация этапа переборного процесса (локализации на  $o$  его неявной оси  $L-R$ ), идущего с участием ТЧ  $\{A-a, B-b, f-e\}$ , обеспечивающей на чевианах вычисление квартета  $W$ -функций, а на луче  $A-B(n)$  – получение оценок  $N(n)$  (врезка вверх слева) и  $F(n)$  (врезка в середине справа), отсекающих ложные решения для “ $b$ ” и “ $b'$ ”. Структурные формулы, задающие композицию, показаны на врезке справа сверху. Остальные пояснения в тексте.

ных  $t(L)$  и  $t(R)$  в концевых вершинах хорды=оси обязательность их пересечения на луче  $P-A$ , тогда как третий тезис утверждает для любой пары  $B(n)$ ,  $A$  возможность построения шаблона ТЧ (даже двух, но достаточно и одного). Следствиями “свойства три” будут: гарантированная возможность построения для любой ложной гипотезы “ $e(i)-d(i)$ ” о положении оси на луче  $f(n)-e(i)$  (где полюс  $f(n)$  задан “ложной” полярной  $A-B(n)$ , не совпадающей с целевой  $A-B$ ) шаблона ТЧ с “наверняка” не выполняемой инцидентностью полюса  $c(i)$  (для его полярной  $d(i)-e(i)$ ; рис. 4) прямой  $A-B(n)$ . Таким образом, процесс обработки  $\mathbf{o}$  по всему диапазону перебора по  $n$  единообразно формирует шаблоны ТЧ, причем имеется возможность на каждом шаге  $n$  произвести оценку отклонения полюса  $c(n)$  от прямой  $A-B(n)$  (если шаблон построен,  $c(i)$  логично обозначить как  $c(n)$ ). Эти оценки можно делать по-разному (врезки на рис. 4). Наконец, универсальное “свойство два” поможет в ситуации (в этой статье, не описываемой отдельным разделом по причине лимита на объем), когда объектом анализа являются частные представители семейства  $\mathbf{o}$  – из подсемейства кривых Ламе (игнорируя генезис, их еще называют “суперэллипсами”), у которых две оси симметрии, а стало быть, возможна ситуация (когда ложная ось для ортоформы параллельна истинной) отсутствия отклонения  $c(n)$  от второй оси, где отбраковке гипотезы поможет оценка  $W(P, B, o, A) \neq 1$ .

Вернемся к методам контроля неверных гипотез о положении оси (рис. 4). Помимо непосредственного вычисления расстояния от точки  $c(n)$  до прямой  $A-B(n)$ , на рис. 4 не показанного из-за перегруженности данными сходного типа, целесообразно производить оценку  $F$  расстояния между точками  $t1$  и  $t2$  в пересечениях с прямой  $A-B(n)$  касательных  $t(d(i))$  и  $t(e(i))$  (средняя врезка справа на рис. 4; для шага внешнего цикла эти вершины правильнее обозначить  $d(n)$  и  $e(n)$ ). Аналогом степеней неколлинеарности на врезке слева вверху показан ход оценки  $N$ , вычисляемой в виде разности тангенсов углов наклона (в любой прямоугольной системе декартовых координат) прямых  $A-B(n)$  и  $A-c(n)$ . Врезка с функционалом  $N$  демонстрирует возможность дать сигнал о выбраковке ложных решений для позиций “b” и “b’”, не совпадающих по номеру для  $N(n)$  и сравниваемой пары  $w3(n)$ ,  $w4(n)$ . Картина с привлечением оценки  $F$  (на средней врезке справа) показывает второе нулевое отклонение “b” для  $F$ , не совпадающее по номеру вершины с ложным номером для пары  $w3(n)$ ,  $w4(n)$ . Наконец, добавим замечание относительно значимой оптимизации процедуры поиска оси, связанной с эмпирически показанным отсутствием необходимости участия в ней шаблона “ТЧ-2”, вычисляемого по правой триаде чевиан  $A-t3$ ,  $B-t4$ ,  $f-d$ .

Все проведенные тесты (числом около полутора для разных ортоформ задания  $\mathbf{o}$  и вариаций позиции  $A$ ) показали, что в рамках тезиса “выбрать в качестве  $e(i)$  вершину на дальней от  $f(n)$  стороне контура  $\mathbf{o}$ ”, второе (всегда существующее согласно теореме 2) позиционное решение в виде “ТЧ-2” не может нарушить тезиса однозначности в оценке координат  $c(n)$  – при построении для ближней стороны  $\mathbf{o}$  на прямой  $f(n)-e(i)$ . На рис. 4 намеренно показаны полюса  $t4$ ,  $t3$  и узел  $o$ , единый для чевиан  $\{A-t3, B-t4, f-d\}$  в ситуации ложной гипотезы  $d(i)-e(i)$  о позиции оси. Этот результат, обязательный (по соображениям симметрии) для целевой конфигурации, в продемонстрированном на рис. 4 примере не может быть обоснован теоретически. В других позициях по  $n$  для  $B(n)$  условие единого узла в “ТЧ-2” может нарушиться (но быть перестроенным по  $i$  в режим выполнения для вершин  $d(i)$  – за счет неисполнения критерия для  $e(i)$  в “ТЧ-1”). Сделанный комментарий завершает обзор методических приемов и модельных испытаний – с применением аппаратов ДП и ТЧ для овалов с неявной аксиальной симметрией – в рамках общей задачи поиска ЭС гладкой чисто выпуклой кривой.

### 3. ИДЕИ И СХЕМЫ ПОИСКА ЦЕНТРА РАДИАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ МЕТОДОМ ДП

Объектом анализа становится теперь  $\mathbf{o}$ , ортоформа которого обладает радиальной симметрией (в качестве синонима используется термин центральная). Как и в случае с  $\mathbf{o}$ , имеющим осевую симметрию, описываемые далее методы обнаружения центра  $\mathbf{o}$  так же подразумевают работу с объектом в любом ракурсе его регистрации. По этой причине нет резона строить процесс поиска центра  $O$  в опоре на декартов признак ортоформы: “любая хорда, проходящая через  $O$ , делится этой точкой пополам”. В общем случае этот закон не адекватен, в итоге требуется привлечь проективно инвариантные признаки данного типа (неявной) симметрии. Формулировка обобщенного признака радиальной симметрии для  $\mathbf{o}$ , представленного ортоформой, включает два независимых свойства ЭС: “для любой хорды  $h$ , проходящей через центр  $O$ , две касательные в ее концевых точках  $A, B$  (на контуре  $\mathbf{o}$ ) пересекаются в несобственной точке  $P_t$ , принадлежащей проективной прямой  $p$ ; хорда  $h$  в пересечении  $Ph$  с  $p$  образует гармонический квартет  $\{A, O, B, Ph\}$ ”. При неортогональной регистрации  $\mathbf{o}$  (в форме неявного проявления ЭС) прямая  $p$ , “живущая в бесконечности”, редислоцируется в окрестности  $\mathbf{o}$ , где бывшую  $p$  именуют теперь «линией горизонта»  $HL$ , каковой инцидентны  $T$  и  $H$ , для ортоформы заявленные как  $P_t$  и  $Ph$  соответственно. Если вспомнить аналогичные определения для осесимметричного  $\mathbf{o}$ , нетрудно усмотреть «плюккес-

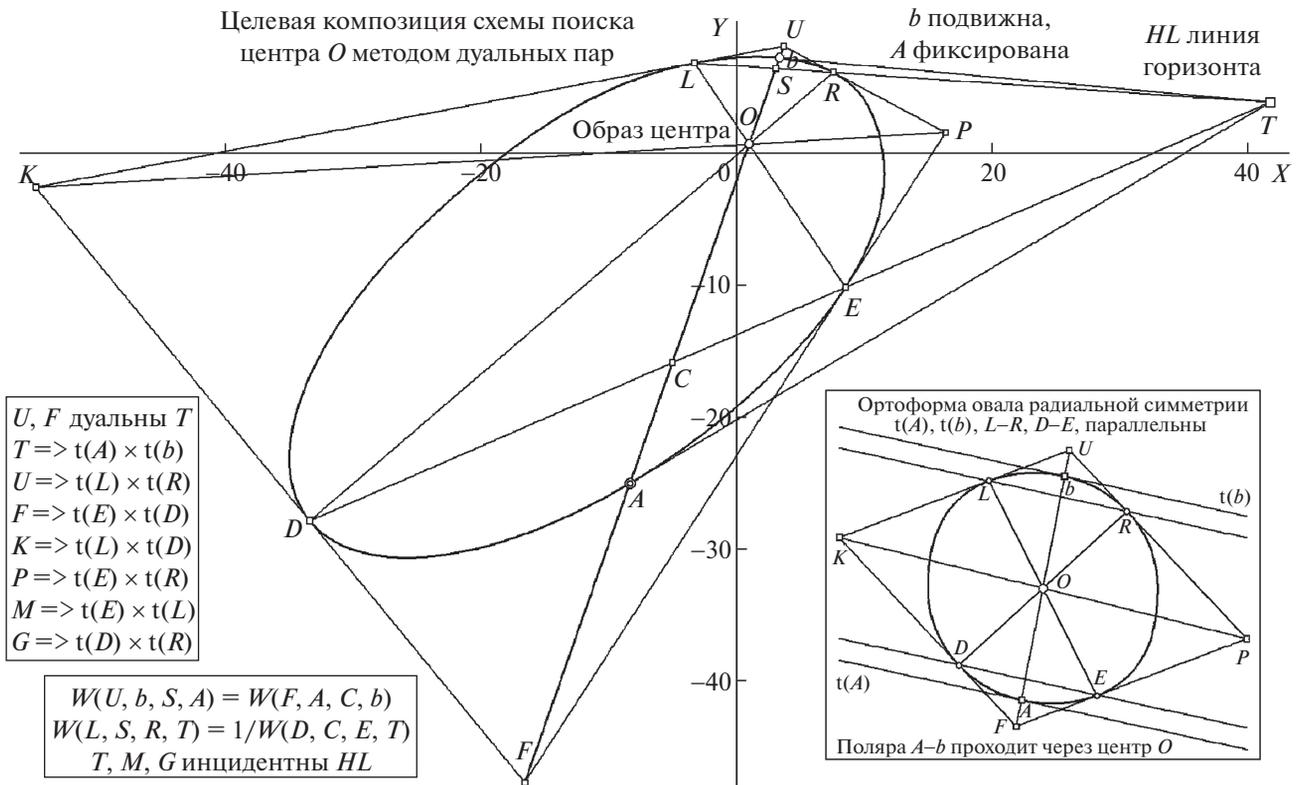


Рис. 5. Метод переборного поиска центра  $O$  для радиальной симметрии с привлечением схемы “троественных дуальных пар” (ДП:  $T, U$  и  $T, F$ ). Аналог финальной конфигурации для варианта ортоформы показан на врезке справа внизу. Остальные пояснения в тексте.

рову взаимность» проявления ЭС в диаде типов симметрии: прямой *оси* дуален ее полюс, тогда как точке *O центра* дуальна прямая *HL*. Перейдем к обсуждению свойств ЭС и идей их переборно процедурной детекции на иллюстративном материале рис. 5.

С той же методической целью, что и при компоновке рис. 1, законы проявления свойств радиальной симметрии – применительно к схеме привлечения ДП в двух формах презентации (общего вида и в качестве ортоформы) демонстрирует рис. 5. Процесс поиска  $O$  строится в той же стартовой постановке со случайным выбором вершины  $A$ , что и в уже описанных ранее вычислительных подходах. Структурные формулы, помогающие понять “логику” композиции, образуемой в процедуре, приведены на врезке слева и используют типовую нотацию. Начнем рассмотрение особенностей включения ДП в процесс поиска  $O$  на модели целевой композиции, реализуемой на примере ортоформы (врезка справа).

Признаки радиальной симметрии, сформулированные выше, выражаются для случая ортоформы, в основном, через свойства параллельности касательных и хорд. Предъявлен случай финальной композиции, когда номер вершины  $b$  задает хорду  $A-b$ , проходящую через искомую  $O$ .

При этом из несобственной точки  $T'$ , где “пересекаются параллельные” касательные  $t(A)$  и  $t(b)$ , вычислены направления прямых  $L-R$  и  $D-E$  такие, что полюс  $U$  в пересечении  $t(L)$  и  $t(R)$ , как и  $F$  на пересечении  $t(D)$  и  $t(E)$ , образуют (в полюсах  $U$  и  $F$ , по отношению к  $T'$ ) два шаблона ДП, т.е.  $U$  является полюсом для плюккеровой поляры  $L-R$ ,  $F$  играет ту же роль для  $D-E$ , а полярка  $A-b$  с ее полюсом  $T'$  являются элементом, дуальным для обеих ДП. Описанная конфигурация имеет проективно инвариантные свойства, учет которых детерминирует список позиционных критериев целевой картины, пригодный как для ортоформы (врезка), так и для презентации в общем виде (в скрытой форме для ЭС).

Следствием того, что  $T'$  детерминирует проективный пучок лучей  $T'-A$ ,  $T'-b$ ,  $T'-R-L$  и  $T'-E-D$  для ортоформы, а в целевой картине неортогонального ракурса эта конфигурация из полюса  $T$  (с конечными координатами окрестности  $o$ , и исключительно из одних лишь соображений симметрии) выглядит пучком лучей в направлении  $A$ ,  $b$ ,  $R$  и  $E$ , реализуются выполненными следующие закономерности: 1) прямая, соединяющая точки  $P$  и  $K$  (их структурные формулы “ $P=>t(E) \times t(R)$ ” и “ $K=>t(D) \times t(L)$ ” приведены на врезке слева), проходит через центр  $O$ ; 2) на хорде  $U-F$  вурфы

$W(U, b, S, A)$  и  $W(F, A, C, b)$ , где  $S$  и  $C$  – инцидентны  $A-b$  в пересечениях с  $T-L$  и  $T-D$ , имеют равные значения; 3) значения вурфов  $W(L, S, R, T)$  и  $W(D, C, E, T)$  обратно пропорциональны; 4) триада  $T, M, G$  лежит на линии горизонта  $HL$ , при том, что  $M$  задает операция  $t(E) \times t(L)$ , а  $G$  определяется по “ $t(D) \times t(R)$ ”.

Условие 1 фиксирует позицию  $O$  на  $A-b$ . Независимые закономерности  $2 \div 4$  логично привлечь (в разных комбинациях) либо для критерия достижения (варьируемой позицией  $b(n)$ ) целевой конфигурации, либо для отбраковки ложных решений. Позицию  $O$  можно вычислить (не прибегая к оценке координат  $P$  и  $K$ , предваряемой формированием квартета касательных) через решение линейного уравнения  $W(F, A, O, b) = W(U, b, O, A)$ . Указанная “пластичность” в привлечении теоретических положений для оптимальной организации процедуры детекции  $O$ , а также “априорная избыточность” их списка (т.е. отсутствие “нужды в дублировании” проверочных оценок, диктуемое на уровне теории), при работе над техническими реализациями могут способствовать переходу предлагаемых подходов из квалификационной аттестации “модель” в категорию “автоматическая система”.

Перейдем к обсуждению реализованной модели поиска  $O$ . Концепцию организации процедуры можно назвать уже стандартной: во внешнем цикле обработки (переменная  $n$ ) происходит дискретная смена ориентаций хорды  $A-b(n)$ , так что вершина  $A$ , позиционно фиксированная случайным образом, совместно с текущим положением вершины  $b(n)$  на каждом шаге  $n$  задают (итогом операции “ $T(n) \Rightarrow t(A) \times t(b(n))$ ”) позицию полюса  $T(n)$ , из которого луч сканирования (по переменной  $i$  во внутреннем цикле численной схемы) для терминальных фрагментов  $A-b(n)$  находит перебором сначала для  $R(i)$  искомое положение  $R(n)$  такое, что поляра  $R(n)-L(n)$  детерминирует через терминальные касательные позицию полюса  $U(n)$ , располагающегося максимально близко к полюсу  $A-b(n)$ , после чего такой же поиск со стороны  $A$  перебором вершин по  $i$  приводит к формированию второго шаблона ДП, где луч из  $T$  на  $E(i)$  задает в финальной позиции  $E(n)$  текущую композицию ДП в виде полюса  $F(n)$  для поляры  $E(n)-D(n)$  (рис. 6, где полюс  $F$  не показан из-за его локализации вне избранного поля рисунка). Позиционные итоги шага  $n$  должны быть далее проверены на соответствие заранее заданным и процедурно введенным критериям целевой картины.

Опишем функции контрольных оценок, использованных нами в модельных тестах. В качестве одного из показателей отклонения текущей конфигурации от искомой работала оценка  $r(n)$ , вычисляемая в виде расстояния между точками  $c1$  и  $c2$  (позиции первой и второй задаются форму-

лами  $c1(n) \Rightarrow A-b(n) \times P(n)-K(n)$  и  $c2(n) \Rightarrow L(n)-E(n) \times R(n)-D(n)$  соответственно, означающими вычисление координат пересечений прямых, заданных парой точек), целесообразность чего является следствием особенности 1, свойственной целевой композиции. Ход этой функции в виде кривой  $r(n)$ , где позиция “В” соответствует искомому расположению вершины  $B(n)$ , показан на правой нижней врезке рис. 6. На той же врезке воспроизведено поведение 10-кратно увеличенной оценки  $u(n)$ , равной модулю разности  $W$ -функций  $W(U, b, S, A)$  и  $W(b, C, A, F)$ , равенство которых для целевой картины декларирует свойство 2. Наконец, там же демонстрируется поведение функции  $f(T, M, G)$ , оценивающей степень “неколлинеарности” триады  $\{T(n), M(n), G(n)\}$ , в целевой картине имеющими согласно признаку 4 обязательную инцидентность линии горизонта  $HL$  (что и проиллюстрировал общий вид “не-целевой” композиции – с уклонением  $M$  от прямой  $G-T$  (рис. 6)). Врезка слева вверху показывает ход оценки степени “не-инцидентности” полюса  $F(n)$  относительно “главной” поляры  $A-b(n)$  при “почти круговом” сканировании вершин  $o$  (от правой окрестности  $L$  до левой окрестности  $R$  – через  $D, A, E$ ), где  $L$  и  $D$  ведут себя (согласно радиально симметричным особенностям расположения вершин на ортоформе, что “убеждающее” демонстрирует врезка на рис. 5) симметрично паре  $E, R$  относительно фиксированной  $A$ . Стандартным оказался и “расклад”: ложные решения, фигурирующие на массиве вычисляемой разности  $W$ -функций  $u(n)$  (ложные решения при метках “ромб”, на врезке рис. 6 обрамляющие позицию “В”, где  $u(n) = |W(U, B, S, A) - W(F, A, C, b)|$ ), однозначно отвергаются системой проверочных оценок  $r(n)$ ,  $f(T, M, G)$  и  $N(n)$ . Степень уверенности в адекватности итогового решения (по причинам целесообразности создания “запаса робастности” в ситуации наличия значительного уровня координатного шума, что реально при гипотетической технической реализации развитых здесь подходов) может быть увеличена благодаря дополнительному включению в процедуру поиска о деклараций тезиса 3 (в опоре на свойства  $W$ -функций, независимые от сформулированных для  $u(n)$ , что не показано на рис. 6 по причине перегруженности иллюстративными данными, мало отличающимися по характеру поведения). Этими прогнозическими соображениями мы заканчиваем описание метода оценки координат  $O$ , представляющего центр радиальной симметрии  $o$ , переходя к рассмотрению той же задачи переборного характера, но теперь реализуемой не посредством тройственной схемы ДП, а с привлечением инструмента ТЧ.

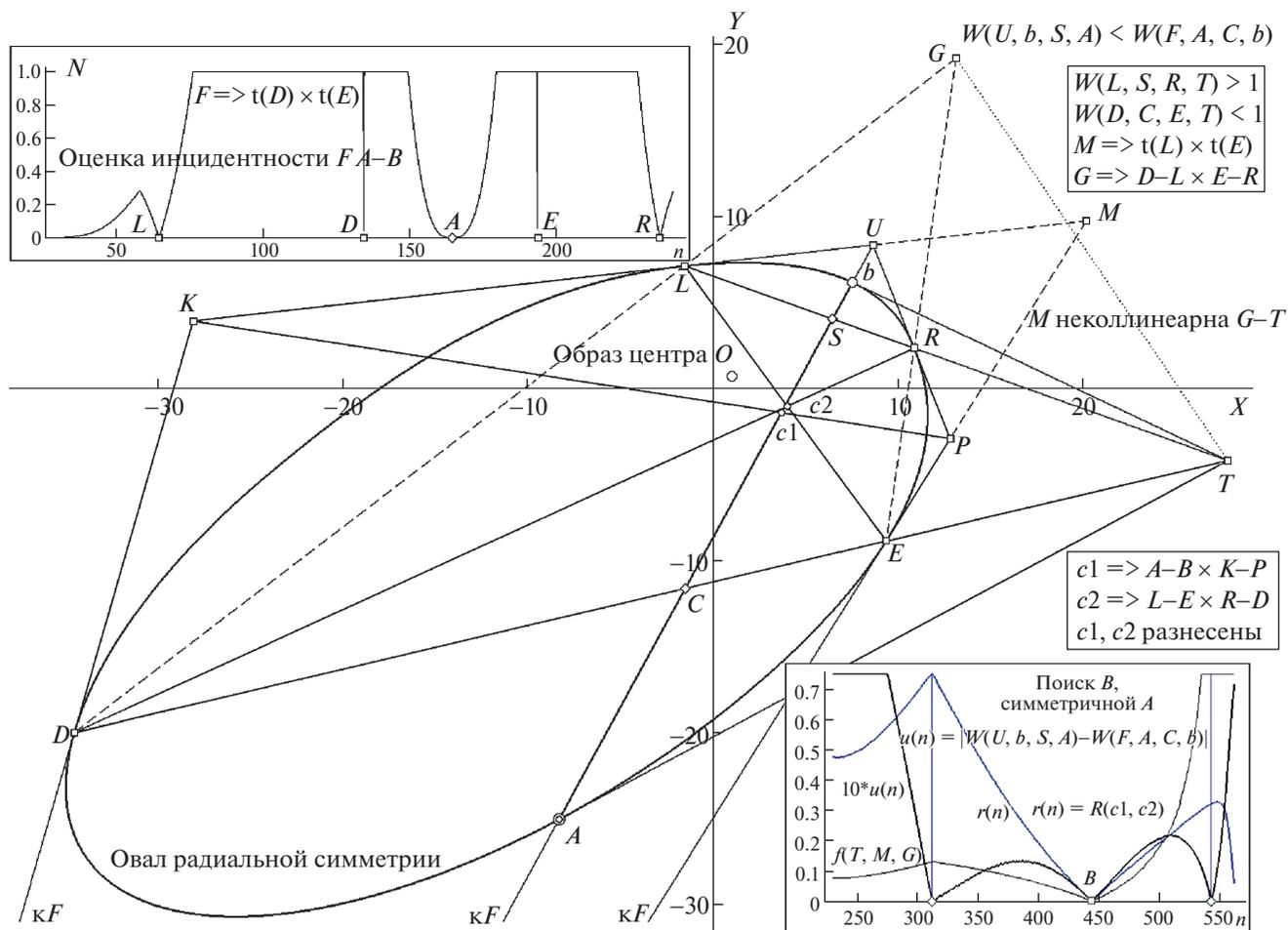


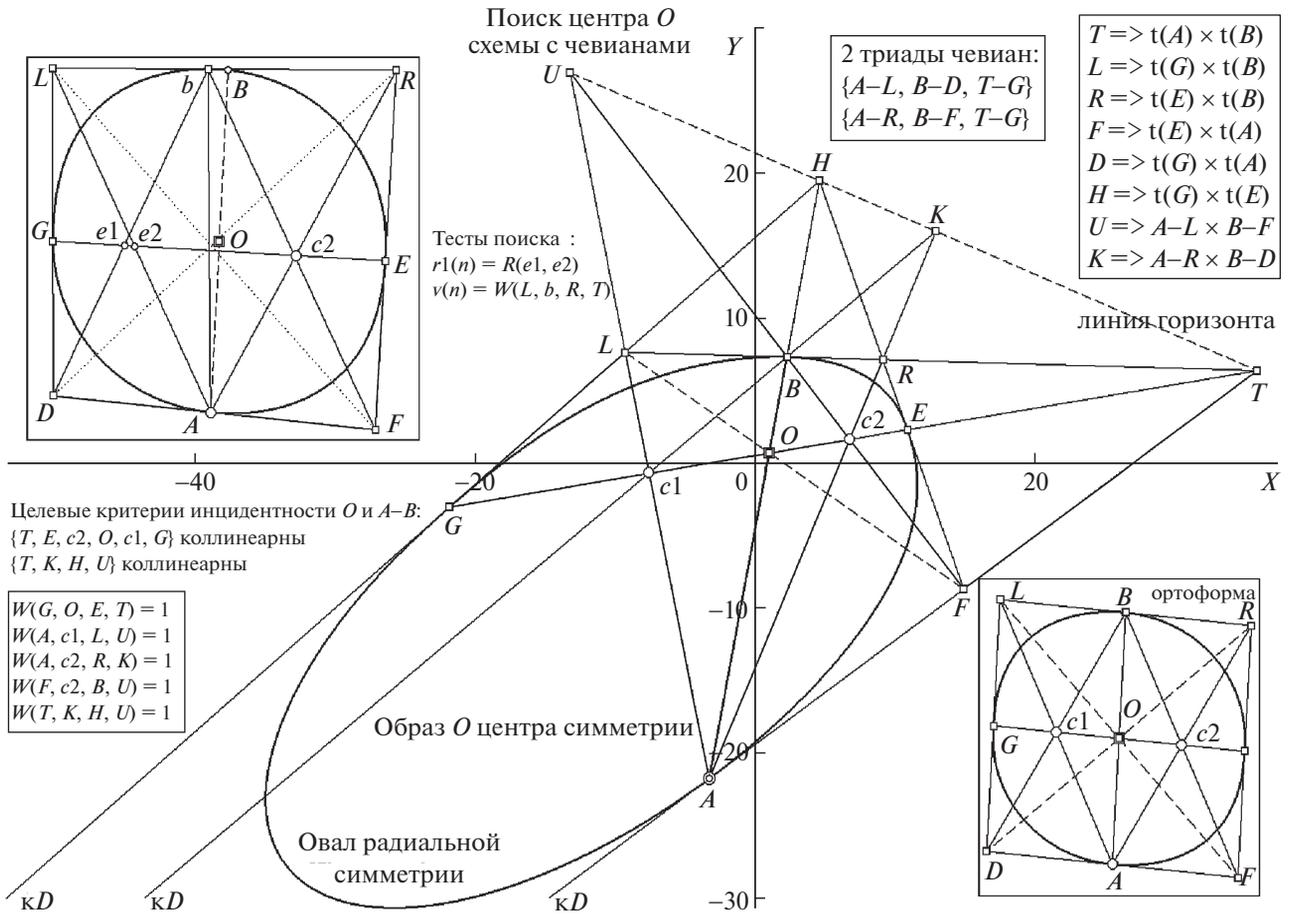
Рис. 6. Этап переборной процедуры поиска  $O$  у  $o$  радиальной симметрии методом “ДП” с использованием финального критерия  $W(U, b, S, A) = W(F, A, C, b)$  для основной функции  $u(n)$  и при участии контрольных  $r(n)$ ,  $f(T, M, G)$  (графики на врезке справа внизу) и  $R(n)$ , в финале фиксирующей  $\{L, D, A, E, R\}$  (врезка слева вверху). Остальные пояснения в тексте.

#### 4. О МЕТОДАХ ПОИСКА ЦЕНТРА РАДИАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ $O$ НА ОСНОВЕ СХЕМ ТЧ

Общая структурная организация обсуждаемой процедуры обработки  $o$  на примере привлечения “инструмента детекции в виде тройственных ДП”, оставаясь неизменной на уровне идеи двухпараметрического перебора вершин и роли контрольных проверок для отсева неадекватных позиционных гипотез – при переходе от осесимметричного объекта к фигуре с центральной симметрией (и при смене “приема детекции” ЭС), с точки зрения количества теоретически приемлемых вариантов реализации переборного процесса – по итогам модельных тестов демонстрирует их заметное увеличение в случае  $o$  радиальной симметрии. Предпринятый нами предварительный анализ вариативности реализаций при переходе к ТЧ-схемам выявил еще большее количество “работающих версий” (в рамках сохраняющейся вы-

шеупомянутой общей концепции), в сравнении с применением схемы ДП. Эти обстоятельства повлияли на акцентацию в подаче материала по заявленной теме. Больше внимания при рассмотрении схем ТЧ будет уделено “инвариантным блокам”, из которых “можно конструировать процедуру обработки”, нежели ей самой, из конкретных блоков заданным образом собранной. Оптимальным вхождением в тему представляется сравнительное ( $o$  общего вида и его ортоформа) описание элементов и композиций, в построениях с ТЧ обладающих проективно инвариантными характеристиками (рис. 7).

Рисунок 7 организован по той же методике, что и рис. 5: основная часть картины дает детализированное представление о трансформациях построений с участием ТЧ, которые происходят при переходе от презентации ортоформой (на врезках) к проекции  $o$  общего вида, при том, что изображается *целевая* композиция (завершившегося



**Рис. 7.** Искомая конфигурация вершин и полюсов в процедуре детекции центра  $O$  (для  $\bullet$  радиальной симметрии, с случайно заданной  $A$ ) с привлечением аппарата “ТЧ” и целевых критериев коллинеарности  $\{T, E, c2, O, c1, G\}$ ,  $\{T, K, H, U\}$  в презентации общего вида и на примере ортоформы  $\bullet$  (врезки справа внизу и слева вверх). Комментарии в тексте.

поиска  $O$ ). Врезка (нижняя, справа) на модели  $\bullet$  радиальной симметрии изображает структуру двух ТЧ для случайно фиксированной позиции  $A$  (относительно центра  $O$ , заданного явным образом). Список структурных формул в стандартной нотации, позволяющий проследить логику последовательного построения “каркаса для вурфов”, размещен во врезке справа сверху (запись вида “ $U \Rightarrow A-L \times B-F$ ” означает, что координаты  $U$  вычислены в пересечении прямых, которым парно инцидентны  $A, L$  и  $B, F$ ). Структура ряда вурфов, порождаемых гармоническими квартетами в целевой композиции, приведена на левой врезке внизу. Как это свойственно презентации  $\bullet$  в ортоформе, пары параллельных хорд, фиксируемые в ней по законам симметричных отношений, имеют полюсами “пересечения” несобственные точки, принадлежащие несобственной прямой. В неортогональной проекции общего вида они приобретают конечные координаты, что упрощает “запись и восприятие их участия” в ор-

ганизации коллинеарных квартетов для структур вурфов.

Проследим последовательность задания элементов при формировании требуемой композиции на ортоформе. Для случайно выбранной  $A$  задана симметричная ей вершина  $B$  ( $AO = OB$ ). Согласно **теореме 2**, для фиксированной пары  $A, B$  обязательно существуют два решения по схеме “ТЧ”. Для конкретного задания геометрии  $\bullet$  найдено положение такой хорды  $G-E$  (проходящей через  $O$ ), что на пересечениях касательных в  $A, E, B$  и  $G$  из сета полюсов  $\{D, L, R, F\}$  образуется “каркас=параллелограмм”, позволяющий указать положения двух композиций ТЧ. Правую образуют  $A-R, B-F$  и хорда  $G-E$ , продолженная до несобственной  $T'$  (после перепроецирования к виду с неявным ЭС обозначаемая уже как  $T$  на основном поле рис. 7). Левая ТЧ составлена из пары  $A-L, B-D$  и той же, “до  $T$  расширенной”  $G-E$ . Из условий обязательной параллельности пар  $\{A-R, B-D\}$ ,  $\{A-L, B-F\}$  (с их несобственными  $K$  и  $U$ ) следует, что при *неявном* представлении  $\bullet$  линии горизон-

та  $HL$  будут инцидентны  $\{T, K, H, U\}$ , а вхождение  $H$  в  $HL$  – следствие параллельности  $D-L$  и  $R-F$ . Если заметить, что квартет  $\{T, K, H, U\}$  является проекцией коллинеарной четверки  $\{T, R, B, L\}$  из вершины  $A$ , то станет ясна аргументация гармонического и “неочевидного” свойства  $W(T, K, H, U) = 1$ , зафиксированного в нижнем ряду списка на левой врезке, ибо квартет  $\{T, R, B, L\}$  для ортоформы имеет вид  $\{T', R, B, L\}$ , где отрезки  $R-B$  и  $B-L$  из тех же соображений симметрии должны быть равной длины (что возвращает нас к обсужденному примеру гармонической композиции  $w[x, x, \infty] \equiv 1$ , а “документальным примером триады  $w[2, 1, 3] \equiv 1$  выступает” коллинеарный квартет  $\{F, c2, B, U\}$ ). Подобные компарации позволяют без затруднений “доказать внушительный ряд утверждений” (шире списка из пяти уравнений, приведенных на левой врезке) о гармонических свойствах коллинеарных квартетов, извлекаемых из картины отношений линейных элементов (показанных на рис. 7 общего плана), желательных для включения в конструируемую процедуру обработки (с целью ее оптимизации) – на ролях данных для основной  $W$ -функции (в переборной схеме детекции  $O$ ) либо для организации массива  $\{R_k(n)\}$  независимых проверок на интервале  $n$ , отсекающих ложные оценки “по факту несовпадения искомым номеров в разных  $R_k(n)$ ”.

Прояснению моментов, связанных с утратой гармонических свойств для текущих композиций ТЧ в их “поисковом виде”, может помочь вид ортоформы  $\mathbf{o}$  на этапе перебора с несимметричной (относительно  $A$ ) позицией  $b$ , показанный на верхней врезке слева. На численных моделях получена устойчивая альтернатива: во внутреннем цикле перебора, на этапе поиска шаблонов, не удастся сформировать две композиции ТЧ с общим носителем  $G-E$  “в соосном варианте – для пары чевиан из разных комплектов”, реализуемого для финальной конфигурации (нижняя врезка справа). Единообразно выбирая по отношению к полюсу  $T$  либо дальнюю, либо ближнюю часть контура  $\mathbf{o}$ , одну композицию ТЧ (на врезке – правую) стабильно=надежно использовать в качестве контрольно эталонной, где все три чевианы пересекаются в “ $c2$ ”, тогда как вторую, с ее нереализуемым критерием пересечения пары чевиан на хорде  $G-E$ , привлекать в качестве “индикатора сближения с искомой картой отношений” (с ситуацией двух ТЧ с общей хордой), где мерой сближения избрано, например, расстояние между “рассогласованными” узлами “ $e1$ ” и “ $e2$ ”. Условие этой проверки вынесено на поле рис. 7 в качестве одной из контрольных функций  $g1(n)$ , к числу которых отнесено и вычисление  $v(n) = W(L(n), b(n), R(n), T(n)) - 1$ . Эту  $v(n)$  можно аттестовать и как “основную”, но для сета функций от  $n$  не так важна принадлежность к  $W$ -функциям, как об-

щая задача для них: найти номер вершины с максимальным числом совпадений по всему их списку. Роль “контрольной можно назначить” оценке расстояния между позициями “ $A-b(n) \times G(n)-T(n)$ ” и “ $L(n)-F(n) \times D(n)-R(n)$ ”, поскольку обе “обязаны” совместиться на целевой конфигурации в искомой  $O$  (правая врезка “зримо подтверждает это”). Таким образом, подобный функционал, не будучи  $W$ -функцией и не требуя затрат на оценку позиций дополнительных касательных и полюсов, не только укажет “истинный номер вершины  $B$ ”, но и задаст искомые координаты неявного центра симметрии.

Была предпринята тест=проверка тезиса о произвольности выбора в альтернативе: “создав правый шаблон ТЧ, по левой композиции – оценить разброс  $e$  ( $g1(i) = R(e1, e2)$ )” либо “левый шаблон ТЧ построив, по данным правой композиции дать оценку для диады  $o$  ( $g2(i) = R(o1, o2)$ )”. Итоги численной модели (на том же  $\mathbf{o}$ , что изображен на рис. 7), для шага внешнего цикла с фиксированной верной позицией  $B$  и варьируемым положением оптимизируемой вершины  $G(i)$ , демонстрируются на рис. 8. Показано поведение обеих контрольных функций  $g1(i)$  и  $g2(i)$  (совместно с рядом других, – с тем же функциональным назначением). Помимо “динамики оппозитных” кривых  $g1(i)$  и  $g2(i)$  рис. 8 воспроизводит ход функций  $g3(i)$  и  $g4(i)$ : для сета полюсов  $T, H$  и “точек схода”  $U, K$  функции оценивают степень неколлинеарности триад  $\{T, H, U\}$  и  $\{T, K, H\}$ . Для каждой триады вычисляются угловые (через тангенс) отклонения хорд, инцидентных комбинируемым парам точек в триаде. При условии, что луч  $T-G(i)$  включает центр  $O$ , финальная диспозиция четверки на прямой  $HL$  должна обеспечить их гармонический порядок. На том же графике отражено поведение кривой  $w(i) = 1 - W(G(i), O(i), E(i), T)$ , для которой гипотеза о расположении центра задается вычислением пересечения  $O(i) \Rightarrow A-B \times T-G(i)$ . Поскольку в окрестности  $G$  отклонение от 0 у трех функций  $\{g3(i), g4(i), w(i)\}$  весьма незначительное, на малую врезку в поле рисунка вынесен фрагмент их сета с удесятеренной амплитудой. Да и сама  $W$ -функция  $w(i)$  настолько мала в масштабе величин угловых отклонений  $g3(i), g4(i)$ , что ее ординаты на основном графике пришлось “поднять множителем  $25 \times$ ”.

Завершим тему “участия ТЧ в задаче поиска  $O$ ” демонстрацией поведения функций  $g1(n), g2(n), g3(n)$  и  $v(n)$  во внешнем переборном цикле численного эксперимента с тем же центрально симметричным  $\mathbf{o}$  (и не измененной позицией вершины  $A$ ) при условии, что все оптимизации для ТЧ благополучно завершены (критерий общего узла для ТЧ на каждом шаге  $n$  соблюден; рис. 9). Напомним, что  $v(n) = W(L(n), b(n), R(n), T(n))$  (и уменьшение на единицу ординат  $W$ -функции це-

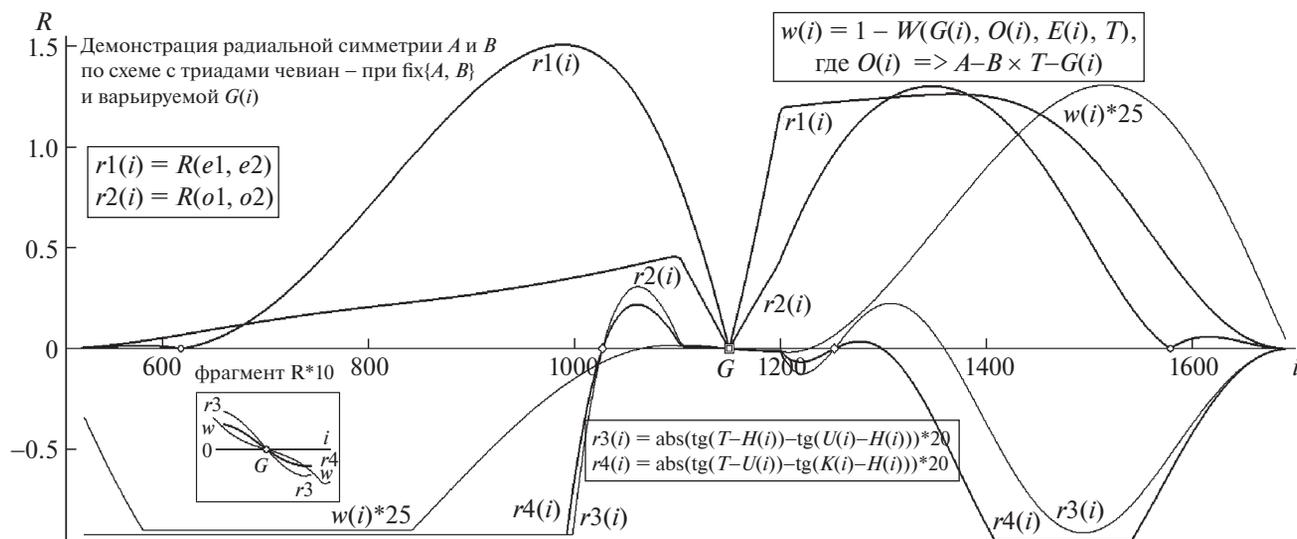


Рис. 8. Роль контрольных функций  $\{r1(i) \div r4(i)\}$  (во вложенном цикле схемы перебора по  $i$ , на шаге с фиксированной полярной  $A-B$  и варьируемой вершиной  $G(i)$ ) и  $W$ -функции  $w(i)$ , подтверждающих гипотезу о  $B(n)$ , как симметричной  $A$ . Остальные пояснения в тексте.

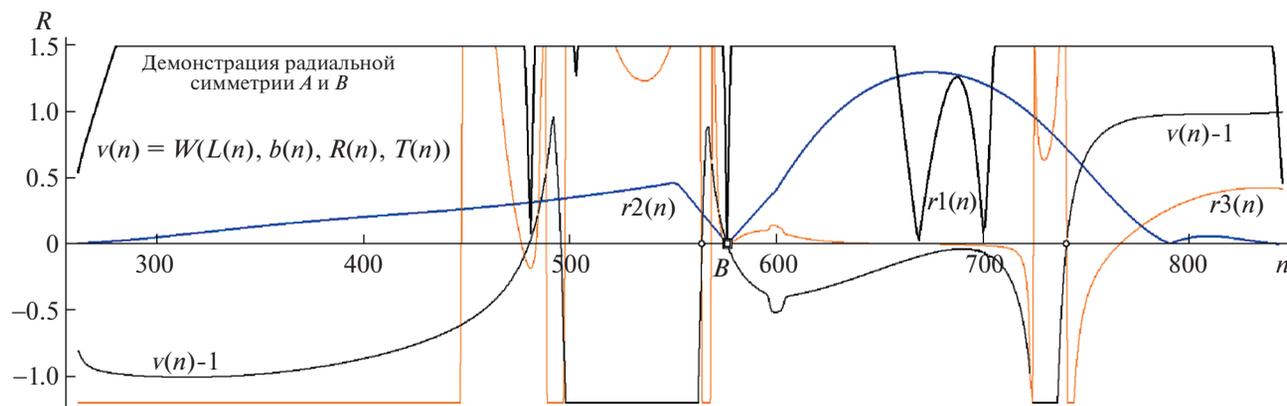


Рис. 9. График функции  $v(n) - 1$  ( $v(n) = W(L(n), b(n), R(n), T(n))$ ) наряду с контрольными  $\{r1(i) \div r3(i)\}$ , “единогласно голосующими” за безошибочную позицию  $B$  (метка “двойной квадрат”), отвергая ложные гипотезы (метка “малый кружок”) сообразно критерию “не максимального числа их подтверждений”. Остальные пояснения в тексте.

лесообразно для отображения *нулевым* уровнем всех ее абсцисс с *гармоническим* значением, что обеспечивает единообразие их представления в совместном показе с функциональными оценками  $g_j(n)$ , выделяющими именно уровень 0). Иллюстрация воспроизводит ход оценок в диапазоне перебора по  $n$ , соответствующем фрагменту контура  $\bullet$  в секторе поиска между лучами  $R-A$  и  $L-A$  (с примерно центральным расположением на нем целевой позиции  $B$ ). На графике “двойным квадратом” помечен номер вершины “ $B$ ”, на который “указывает весь квартет функций”, в то время как для *ложных* решений максимальное

совпадение номеров наблюдается лишь у пары оценок (“ $v(n) - 1$ ”,  $r3(n)$ ; номера совпадений для них маркированы меткой “малый кружок”), что логично расценить “приемлемой адекватностью критерия совпадений” для *однозначной* сепарации искомого позиционного решения. Этой демонстрацией завершим рассмотрение методов поиска ЭС и результатов моделирования по ряду сценариев для них (с привлечением композиций “ДП” и “ТЧ”), переходя от вариантов осевой и радиальной симметрии к новому ее типу – *ротационному* (будет описан частный случай R3).

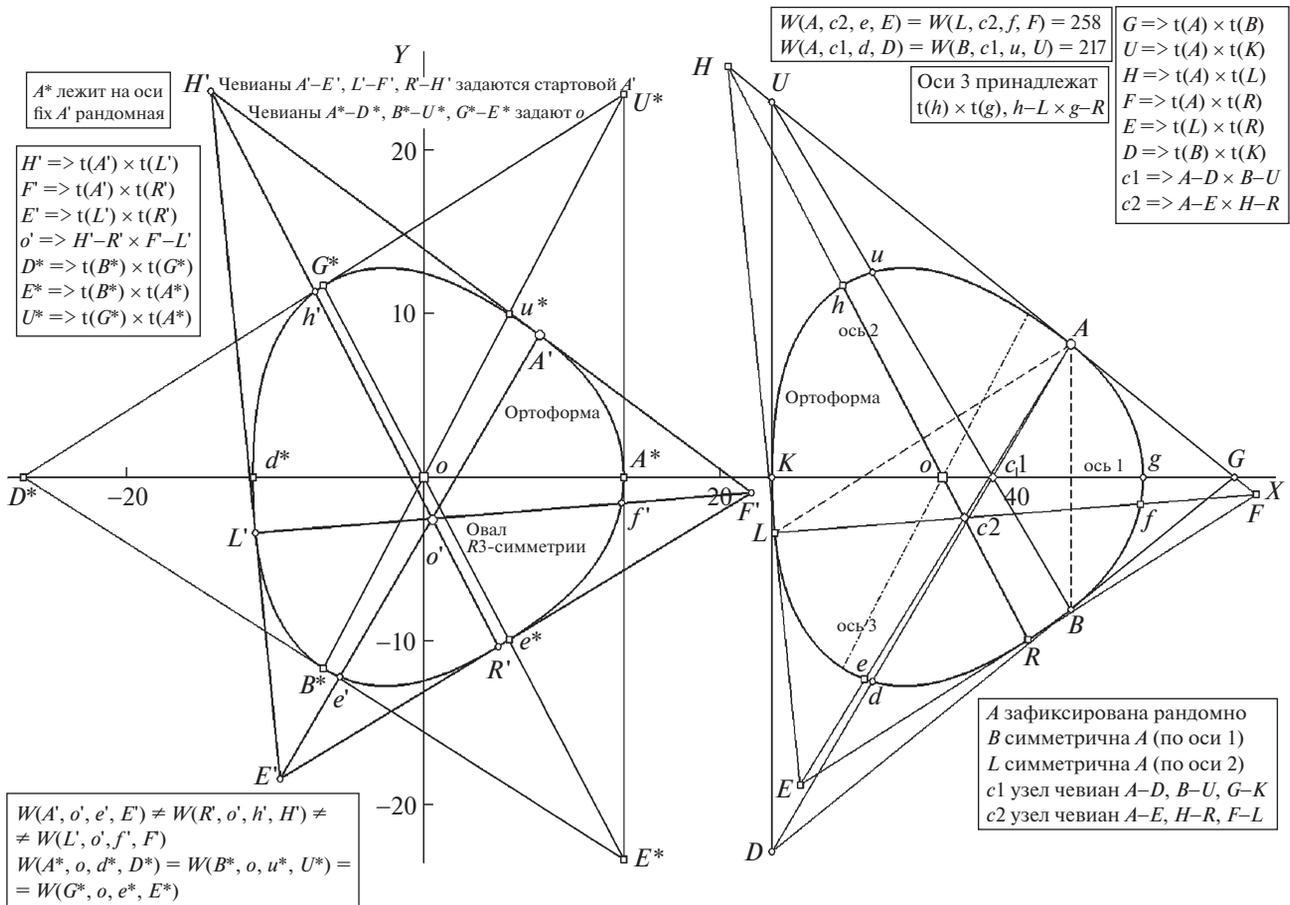


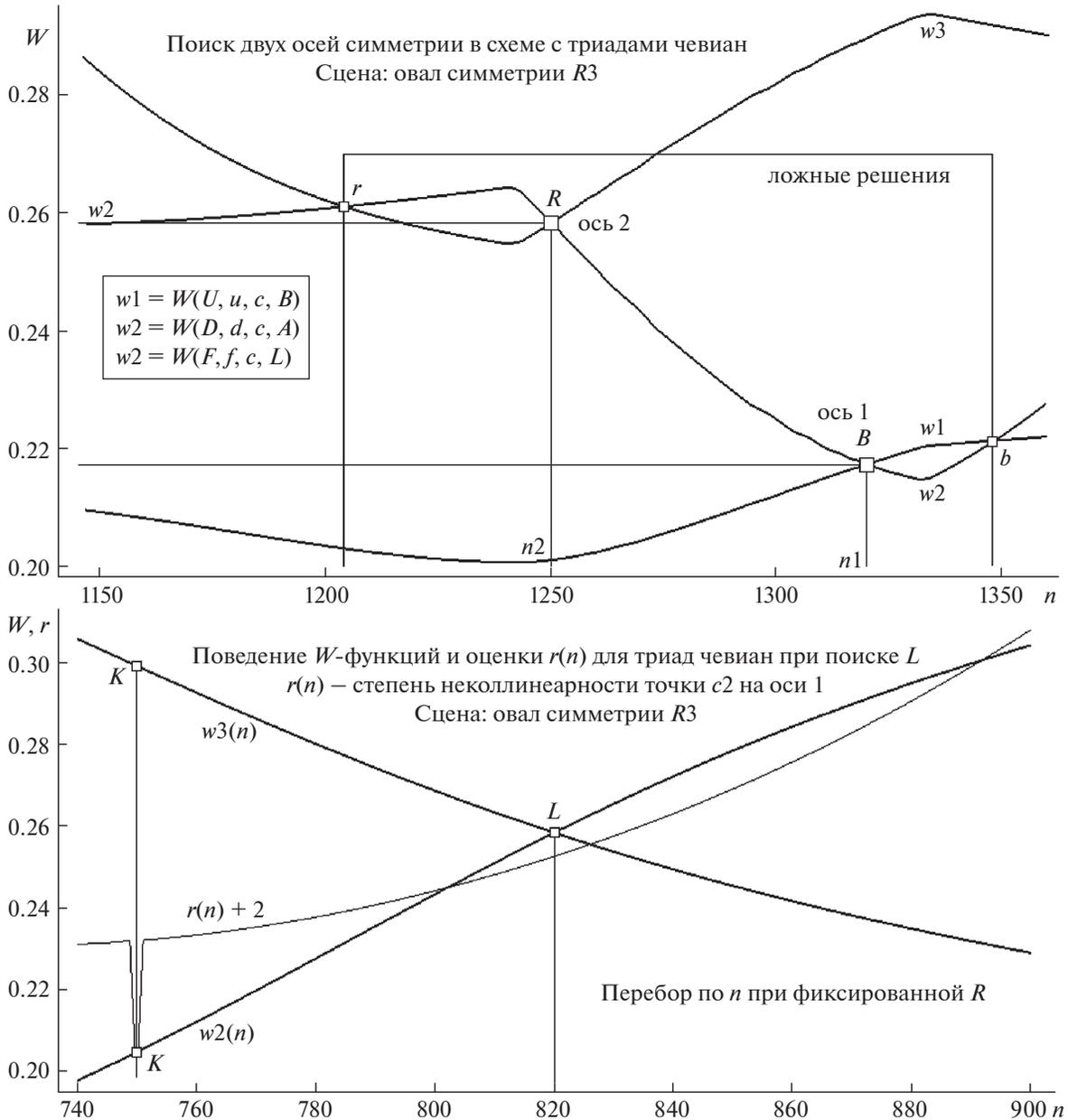
Рис. 10. Новый подход к задаче поиска неявного центра  $O$  (у  $o$  типа R3) привлечением аппарата ТЧ: для случайно заданной  $A$  идет поиск  $B$ , симметричной к  $A$  относительно “оси 1”  $K-g$ , совместно с детекцией  $L$ , симметричной — по “оси 2”  $R-h$  (правая схема). Схема слева показывает “неуспех прямого участия ТЧ” в поиске  $O$ . Комментарии в тексте.

### 5. О МЕТОДАХ ПОИСКА ЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ “АППАРАТА ТЧ” ДЛЯ $O$ ТИПА R3

Тип симметрии вращения проще всего определить через операцию, порождающую ортоформу  $o$ . Положим существующим угловой фрагмент выпуклой дуги длиной  $2\pi/n$  такой, что  $n$  его дискретных поворотов вокруг точки центра, гладко сопрягающих “начало одной дуги” с концевой точкой следующей, образуют замкнутую кривую, являющуюся  $o$  с типизацией  $Rn$ , в которой  $n$  назовем индексом вращения. Легко понять, что при четном  $n$  фигуры будут относиться к радиально симметричным, а при осевой симметрии самого порождающего фрагмента — к аксиально симметричным с  $n$  осями. В этой таксономии  $o$  радиального типа удовлетворяет номинации R2, поскольку его ортоформа, разрезанная любой центральной хордой, одним поворотом дуги=половинки на  $\pi$  восстанавливает свою целостность. Естественно, что генерации, порождающие “ $Rn$ ” через поворот (при  $n > 1$ ) не могут быть признаком для проективно инвариантного описания таких  $o$ . В рамках этой задачи единственно разумной оста-

ется идея опоры на ансамбль корреспонденции (АК, представляющий собой упорядченный сет  $n$  вершин  $o$ , с произвольной точки разбивающих и  $n$ -кратным поворотом воссоздающих ортоформу), для детекции которого и дальнейшего привлечения АК в поиске центра и создания проективно инвариантного эталона, были разработаны универсальные алгоритмы обработки (Николаев, 2016). Наименее сложной и наиболее часто встречаемой в “технологичном социуме” разновидностью  $Rn$  является  $o$  R3 (“сглаженный треугольник”; цепь касательных к глобуму АК ортоформы представляет собой описанный вокруг  $o$  правильный треугольник). Идею и проективно инвариантные методы поиска  $O$  (образа центра  $o$  “R3”) — “с участием ТЧ” — мы и рассмотрим далее.

Данный раздел тематически нарушает сценарий описания разработанных методов детекции ЭС с последовательной “сменной инструментарики — от ДП к ТЧ” в рубрике тип симметрии  $o$ . Причина отсутствия раздела “роль аппарата ДП в процедурах поиска ЭС для  $o$  типа R3” состоит в нецелесообразности рассмотрения алгоритмов, не имеющих, по авторской оценке, реального шанса тех-



**Рис. 11.** Роль  $W$ -функций в переборном поиске вершин  $R, B$  на  $\sigma R3$  (верхний график) и отсеечение ложных гипотез “ $r$ ” и “ $b$ ” контрольной  $r(n)$  согласно критерию: “истинную позицию фиксирует максимум числа голосов” (внизу). Остальные пояснения в тексте.

нической реализации. Проведенные нами тесты на моделях с включением ДП показали, что для  $\sigma$  ротационного типа (при случайном выборе стартовой вершины  $A$ ) велик процент случаев, когда узел одной из ДП настолько сближен с границей  $\sigma$ , что возможный уровень координатного шума при оценке позиции полюса по данным для касательных может лишить достоверности последующие вычисления ЭС.

Для аппарата ТЧ набранная статистика тестов получилась “не внушающей тревог в плане робастности”, что делает осмысленным описание

идей решения стоящей задачи и модельных итогов по ней, к чему мы и переходим. Начнем с того, что “универсальная пригодность схем ТЧ на ролях детектора АК”, несмотря на ее кажущуюся “очевидность”, является тезисом ложным. Рассмотрим левую схему рис. 10, где на модели ортоформы показано, что лишь при условии совмещения стартовой  $A^*$  со следом одной из трех осей симметрии  $\sigma$  композиция ТЧ будет иметь узлом образ центра  $\sigma$ , что должен подтверждать критерий равенства вурфов на чевианах  $A^*-D^*, B^*-U^*$  и  $G^*-E^*$  (условие равенства вурфов – на левой врез-

ке внизу). Вероятность такого совпадения близка к 0. В случае задания  $A'$  вне выделенных шести вершин  $o$  гипотеза об аппроксимации образа центра позицией узла  $o'$  оказывается ложной вкпе с нарушением равенства значений вурфов на чевианах данного расположения (та же нижняя врезка воспроизводит нотацию неравенства  $W(A', o', e', E') \neq W(R', o', h', H') \neq W(L', o', f', F')$ ). Таким образом, надежды на тривиальное решение задачи не оправдываются, и надо предлагать действительно универсальный подход к проблеме.

Идея метода с необходимой всеобщностью применения достаточно проста: для  $A$  (с ее случайным расположением) требуется найти позиции двух точек, симметричных по отношению к двум осям (тогда третью ось легко локализовать, хотя для оценки позиции  $O$  достаточно безошибочной оценки и двух). На правой схеме рис. 10 показано необходимое построение по этой процедуре (на верхней врезке справа дан список структурных формул, позволяющих уяснить логику в задании операций и функциональность картины). Итогом переборного процесса должно стать формирование двух композиций ТЧ: триада  $A-D$ ,  $B-U$  и  $G-K$  обеспечивает инцидентность узла  $c_1$  оси “1” ( $g-K$ ), тогда как ТЧ  $\{A-E, H-R, F-L\}$  со своим узлом  $c_2$  задает на  $h-R$  ось “2”. При адекватном исполнении всех “установочных и проверочных” требований преобразуемая конфигурация согласуется с правой схемой рис. 10, что позволяет воспользоваться условием идентификации оси “3” (по паре пересечений “ $t(h) \times t(g)$ ” и “ $h-L \times g-R$ ”, ей инцидентных, что показано на верхней врезке справа).

Опишем детальнее процесс детекции  $O$  и его установки. Поскольку основание всех перевычисляемых (по  $n$ ) треугольных каркасов ТЧ – это фиксированная касательная  $t(A)$ , то перебор во внутреннем цикле (по  $i$ ), формирующий ТЧ по критерию общего узла, не вызывает “срыва программы” к вычислению альтернативного для ТЧ решения: все для  $n$  вычисляемые треугольники ( $o$  в них вписан) монотонно меняют позиции второй своей стороны (образованной второй касательной, скользящей от  $f$  до  $d$  – с обходом около  $1/3$  периметра контура). При этом, поскольку схема ТЧ для каждого  $n$  реализуется, то наличие оценки узла  $c(n)$  позволяет вычислить триаду вурфов  $\{w_1, w_2, w_3\}$ , обеспечивающих в финале обхода формирование  $W$ -функций  $W(U(n), u(n), c(n), B(n))$ ,  $W(D(n), d(n), c(n), A)$  и  $W(F(n), f(n), c(n), L(n))$ . Из целевой установки для ЭС (детекция осей “1” и “2”) следует: на шаге  $n_1$ , реализующем условия симметрии  $A$  и  $B$  относительно оси “1”, должно быть выполненным равенство  $w_1(n_1) = w_2(n_1)$ ; на шаге  $n_2$ , который обеспечивает оценку  $R(n_2)$  в роли позиции, симметричной  $A$  относительно оси “2”, справедлив закон  $w_2(n_2) = w_3(n_2)$ ; что и демонстрирует рис. 11 (верхний график). Та-

ким образом, для чевиан при переходе от  $B(n_1)$  к  $R(n_2)$  (обозначим  $B \Rightarrow R$ ) происходят смены:  $D \Rightarrow E$ ,  $L \Rightarrow K$ ,  $H \Rightarrow U$ ,  $G \Rightarrow F$ . “Не стоит удивляться”: и в этом случае для однозначного выбора целевой конфигурации нужны контрольные оценки, поскольку единственно условий  $w_1(n_1) = w_2(n_1)$ ,  $w_2(n_2) = w_3(n_2)$  не достаточно из-за наличия ложных гипотез (дублирующих решение  $R$  ложной  $r$ , а кроме истинной  $B$  предлагающих вариант  $b$ ). На нижнем графике рис. 11 показан прием, дающий верный выбор для  $B$  при идентификации оси “1” (т.е. отсекающий ложную гипотезу “ $b$ ”) и подтверждающий истинность оценки  $c_2$  для оси “2”. Однозначность финальных оценок достигается введением функции  $r(n, i)$ , вычисляющей расстояние от  $c_2(i)$  до прямой  $F-L(i)$  при зафиксированной по  $n$  позиции  $R$  (при “ $L \Rightarrow K$ ”  $r(i) \Rightarrow 0$ , что фиксирует выбор “ $K$ ”). На этом завершим краткий обзор темы “приемы ТЧ-поиска образа центра у  $o$  типа  $R_3$ ”, отметив, что новый подход оптимальней ранее предложенного (Николаев, 2016), так как, непосредственным образом локализуя  $O$ , не требует этапа предварительной детекции АК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании методов проективно инвариантной репрезентации фигур семейства  $o$  немало работ посвящено имеющим особенность *скрытой симметрии* различных типов (Николаев, 2014; 2016; 2017; 2019). Во Введении была сформулирована постановка одной из задач проективно инвариантного описания гладких выпуклых фигур, имеющих те или иные ЭС и “регистрируемых массивом вершин в произвольном ракурсе” (моделируемая оптика камер задана плоской *центральной* проекцией). Такая постановка подразумевает быстрое вычисление дискретного описания (устойчивого к трансформирующим влияниям проективного преобразования плоскости  $o$ ) – в виде *вурф-отображения* либо посредством получения графа *дескриптора* (Николаев, 2016; 2019), формирование которых привлекает концепцию *плоскостного вурфа* (Депутатов, 1926). Интерес к *вурфу*, по сути ключевому элементу *производной Шварца*, рассмотренной более века назад, до сих пор интересен математикам (Овсиенко, Табачников, 2008). Элемент новизны доложенного материала – в том, что не только  $W$ -функции *единообразно* “нашли себе место” в переборном процессе поиска ЭС, выполняя роль позиционных маркеров искомой конфигурации, но и модельно протестированные инструменты детекции ЭС – схемы ДП и ТЧ-композиции – столь же органично вписались в концепцию разработанного подхода: все процедуры берут старт, вовлекая позицию *случайным образом* заданной вершины  $A$  контура  $o$  в “двухуровневый” комбинаторный процесс, где во внешнем цикле перебора формируются требу-

емые (для данного типа ЭС и “применяемого инструмента”)  $W$ -функции, тогда как внутренний цикл обеспечивает построение “инструмента поиска” сообразно критериям его рабочей схемы.

Критерием формирования схем ДП (промоделированных версий – “одинарной” для случая осевой симметрии  $\mathbf{o}$  и “тройственной” – для радиальной) заявлен и программно реализован аспект теоремы взаимности Плюккера (Акимова и др., 2014), в нашем случае (когда объект анализа не *коника*, а представитель семейства  $\mathbf{o}$ ), косвенно подкрепляемый **теоремой 1** (о существовании двух ДП у прямой  $\text{ext}L$ ), “эвристически уточненной нами” – с отрывом от требований наличия для ДП внешнего носителя  $\text{ext}L$  (при “гарантированной возможности для любого полюса, детерминируемого его плюккеровой *полярной*, построить второй, а по необходимости – и третий, дуальный/ные первому”). Эта “подвижная полярная  $A-b(n)$ ”, варьируемая во внешнем цикле переборной процедуры, также является звеном, *общим* для обоих испытанных “инструментов детекции ЭС”. Аналогичный ситуации с ДП “прогресс применения” можно констатировать и для шаблона “ТЧ”. **Теорема 2** о наличии двух позиционных решений в виде ТЧ для *пары* случайным образом заданных вершин  $\mathbf{o}$  “эмпирически уточнена” тезисом *о возможности* эти решения однозначно упорядочить (Николаев, 2020), при том, что в роли “подвижной полярной  $A-b(n)$ ” выступает теперь «пара вершин» из **Теоремы 2**. Превращение эвристических схем в универсальные (“апдэйтом” теорем “1” и “2”) зависит ныне от энтузиазма молодых творцов науки Computer Science.

Полезно повторить тезис введения, что классические дифференциальные методы оценки *инвариантов* для дуг  $\mathbf{o}$  (Картан, 1933; Faugeras, 1993) не приложимы к задачам *технического зрения* (по причинам *практически* не реализуемых требований к точности вычисления производных высокого порядка на *дискретных* сетках для гладкой кривой). Востребованность задач автоматического опознания объектов типа  $\mathbf{o}$  побуждает искать приемлемые подходы с предложениями различных “полуинвариантов” (Olver, 2001; Hann, Nickman, 2002; Musso, Nicolodi, 2009; Hoff, Olver, 2013). Следует отметить, что в этих работах схемы и методы детекции проективно устойчивых свойств *симметрии* выпуклой гладкой кривой не рассматриваются. Свойства симметрии плоских гладких фигур если и исследуются, то, как правило, это относится к кривым *заданного аналитического порядка*. В качестве примера приведем работы (Itenberg, Itenberg, 2004) по исследованию аспектов симметрии у алгебраических объектов *шестого* порядка и (Brugalle, 2007), где обсуждены свойства и особенности кривых *седьмого* порядка. Интересны и современные работы по параметри-

зации и нормализации кривых *ротационной* симметрии (Lebmeir, Jurgen, 2008), а также – по разработке теоретических подходов и реализации задач попарного сравнения аффинно и проективно эквивалентных симметричных кривых (Hauer, Jüttler, 2018). Все процитированные работы не имели объектом исследования представителей семейства  $\mathbf{o}$ .

Сформулируем выводы по рассмотренной теме *Новые функции и задачи для ранее предложенных инструментов обработки  $\mathbf{o}$  – схем “ДП” и “ТЧ”*. Разработаны и испытаны в сериях модельных тестов численные методы решения задач детекции ЭС (скрытых осей и центров) в проективно инвариантной моде поиска, с *однотипной* структурой алгоритмов целевой реализации. Предложенные приемы обработки кривых семейства  $\mathbf{o}$  и полученные по ним модельные результаты оригинальны и, можно надеяться, технически актуальны. Прямые и косвенные аналоги описанных выше аспектов привлечения *дуальных* схем и композиций с *триадами чевиан* не обнаружены нами в доступных базах цитирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-29-09075).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимова Г.П., Богданов Д.С., Куратов П.А. Задача проективно инвариантного описания овалов с неявно выраженной центральной и осевой симметрией и принцип двойственности Плюккера. *Труды ИСА РАН*. 2014. Т. 64. № 1. С. 75–83.
- Балицкий А.М., Савчик А.В., Гафаров Р.Ф., Коноваленко И.А. О проективно инвариантных точках овала с выделенной внешней прямой. *Проблемы передачи информации*. 2017. Т. 53. № 3. С. 84–89.
- Глаголев Н.А. *Проективная геометрия*. М. Высш. Шк., 1963. 344 с.
- Депутатов В.Н. К вопросу о природе плоскостных вурфов. *Математический сборник*. 1926. Т. 33. № 1. С. 109–118.
- Картан Э. *Метод подвижного репера, теория непрерывных групп и обобщенные пространства*. Сб. *Современная математика. Книга 2-я*. М., Л. Гос. технико-теоретическое изд.-во, 1933. 72 с.
- Моденов П.С. *Аналитическая геометрия*. М. Изд-во Моск. ун-та, 1969. 699 с.
- Николаев П.П. Распознавание проективно преобразованных плоских фигур. II. Овал в композиции с дуальным элементом плоскости. *Сенсорные системы*. 2011. Т. 25. № 3. С. 245–266.
- Николаев П.П. Метод проективно инвариантного описания овалов с осевой либо центральной симметрией. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2014. № 2. С. 46–59.
- Николаев П.П. О задаче проективно инвариантного описания овалов с симметриями трех родов. *Вестник РФФИ*. 2016. Т. 92. № 4. С. 38–54. <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2016-092-04-38-54>
- Николаев П.П. Распознавание проективно преобразованных плоских фигур. X. Методы поиска октета

- инвариантных точек контура овала — итог включения развитой теории в схемы его описания. *Сенсорные системы*. 2017. Т. 31. № 3. С. 202–226.
- Николаев П.П. Распознавание проективно преобразованных плоских фигур. XII. О новых методах проективно инвариантного описания овалов в композиции с линейным элементом плоскости. *Сенсорные системы*. 2019. Т. 33. № 1. С. 15–29. <https://doi.org/10.1134/S0235009219010104>
- Николаев П.П. Распознавание проективно преобразованных плоских фигур. XIV. Новые методы проективно инвариантного описания овалов с привлечением  $H$ -поляры и дуальных точек. *Сенсорные системы*. 2020. Т. 34. № 3. С. 226–253. <https://doi.org/10.31857/S0235009220030063>
- Овсиенко И.Ю., Табачников С.Л. *Проективная дифференциальная геометрия. Старое и новое: от производной Шварца до когомологий групп диффеоморфизмов*. М. МЦНМО, 2008. 280 с.
- Савчик А.В., Николаев П.П. Метод проективного сопоставления для овалов с двумя особыми точками. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2018. № 1. С. 40–47.
- Brugalle E. Symmetric plane curves of degree 7: Pseudoholomorphic and algebraic classifications. *Journal fur Die Reine und Angewandte Mathematic (Crelles Journal)*. 2007. V. 612. P. 1–38. <https://doi.org/10.1515/CRELLE.2007.086>
- Itenberg I.V., Itenberg V.S. Symmetric sextics in the real projective plane and auxiliary conics. *Journal of Math. Sciences*. 2004. V. 119 (1). P. 78–85. <https://doi.org/10.1023/B:JOTH.0000008743.36321.72>
- Faugeras O. Cartan’s moving frame method and its application to the geometry and evolution of curves in the euclidean, affine and projective planes. *Joint European-US Workshop on Applications of Invariance in Computer Vision*. Berlin, Heidelberg. Springer, 1993. P. 9–46.
- Hauer M., Jüttler B. Projective and affine symmetries and equivalences of rational curves in arbitrary dimension. *Journal of Symbolic Computation*. 2018. V. 87. P. 68–86. <https://doi.org/10.1016/j.jsc.2017.05.009>
- Hann C.E., Hickman M.S. Projective curvature and integral invariants. *Acta Appl. Math.* 2002. V. 74 (2). P. 177–193. <https://doi.org/10.1023/A:1020617228313>
- Hoff D., Olver P.J. Extensions of invariant signatures for object recognition. *J. Math. Imaging Vision*. 2013. V. 45. P. 176–185. <https://doi.org/10.1007/s10851-012-0358-7>
- Lebmeir P., Jurgen R.-G. Rotations, translations and symmetry detection for complexified curves. *J. Computer Aided Geometric Design*. 2008. V. 25. P. 707–719. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2008.09.004>
- Musso E., Nicolodi L. Invariant signature of closed planar curves. *J. Math. Imaging and Vision*. 2009. V. 35 (1). P. 68–85. <https://doi.org/10.1007/s10851-009-0155-0>
- Olver P.J. Geometric foundations of numerical algorithms and symmetry. *Appl. Alg. Engin. Comp. Commun.* 2001. V. 11. P. 417–436. <https://doi.org/10.1007/s002000000053>
- Sanchez-Reyes J. Detecting symmetries in polynomial Bezier curves. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2015. V. 288. P. 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.04.025>

## Recognition of projectively transformed planar figures.

### XV. Methods for searching for axes and centers of ovals with symmetries, using a set of dual pairs of cevian triads

P. P. Nikolaev<sup>a,b,#</sup>

<sup>a</sup> Institute for Information Transmission Problems “Kharkevich Institute” RAS, 127994 Moscow, Bolshoy Karetny per., 19, Russia

<sup>b</sup> Smart Engines Service LLC, 117312 Moscow, Prospect 60-Letiya Oktyabrya, 9, Russia

<sup>#</sup> E-mail: nikol@iitp.ru

A number of new enumeration-type procedures for searching *symmetry elements* of oval curves (their *axes* or *centers*) are suggested and modelled, which are based on alternative methods involving one of the two projectively invariant structures on the figure field: a set of so-called *dual pairs* (DP) or a *cevian triad* (CT) having the property of their intersection at the common interior point  $c$  of the oval ( $\mathbf{o}$ ). In this paper, each of the two DPs is specified on a Plucker polar curve determined by its external pole  $P$ , for the position of which conditions are formulated that are satisfied in the enumeration scheme, according to the properties of  $P$  to belong either the symmetry *axis* of  $\mathbf{o}$  or a chord intersecting the desired *center* of  $\mathbf{o}$  (for the cases of *radial* or *rotational* symmetry of an odd index). Similarly, CTs with the node  $c$  are used when searching for the positions of projectively symmetric pairs of points of the contour  $\mathbf{o}$ , which, when iterating over the vertices, satisfy certain relations that are valid for the *central* (two kinds) or *axial* structure of  $\mathbf{o}$ .

**Key words:** oval, center and axis of symmetry, Plucker pole and polar curve, dual pairs, harmonic wurf, wurf function, projectively invariant W-mapping, cevian

## REFERENCES

Akimova G.P., Bogdanov D.S., Kuratov P.A. Zadacha projektivno invariantnogo opisanija ovalov s nejavno vyrazhennoj central'noj i osevoj simmetrijej i princip

dvojtvennosti Pljukera [Task projectively the invariant description of ovals with implicitly expressed central and axial symmetry and the principle of a duality of Plucker]. Trudy ISA RAN [Proceedings of the ISA RAS]. 2014. V. 64 (1). P. 75–83 (in Russian).

- Balitsky A.M., Savchik A.V., Gafarov R.F., Konovalenko I.A. O proektivno invariantnykh tochkah ovala s vydelennoj vneshnej prjamoj. [On projective invariant points of oval coupled with external line]. *Problemy peredachi informacii [Problems of Information Transmission]*. 2017. V. 53(3). P. 84–89 (in Russian).
- Deputatov V.N. K voprosu o prirode ploskostnykh vurfov [On the nature of the plane wurfs]. *Matematicheskij sbornik [Mathematical collection]*. 1926. V. 33 (1). P. 109–118. (in Russian).
- Glagolev N.A. Proektivnaja geometrija [Projective geometry]. Moscow, Vysshaja shkola [High school]. 1963. 344 p. (in Russian).
- Kartan Je. Metod podvizhnogo repera, teoriya neprevnykh grupp i obobshchennye prostranstva. Sb. Sovremennaya matematika. Kniga 2-ya [The method of a moving ranging mark, the theory of continuous groups and generalized spaces]. Moscow, Leningrad, Gosudarstvennoe tehniko-teoreticheskoe izdatel'stvo [State technical and theoretical publishing]. 1933. 72 p. (in Russian).
- Modenov P.S. *Analiticheskaja geometrija* [Analytic geometry]. Moscow, Izdatel'stvo moskovskogo universiteta [Moscow University Press]. 1969. 699 p. (in Russian).
- Nikolaev P.P. Raspoznavanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. II. Oval v kompozitsii s dual'nykh ehlementom ploskosti. [Recognition of projectively transformed planar figures. II. An oval in a composition with a dual element of a plane]. *Sensornye sistemy [Sensory systems]*. 2011. V. 25 (3). P. 245–266. (in Russian).
- Nikolaev P.P. Metod proektivno invariantnogo opisaniya ovalov s osevoi libo tsentral'noi simmetriei [A method for projectively-invariant description of ovals having axial or central symmetry]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*. 2014. № 2. P. 46–59. (in Russian).
- Nikolaev P.P. O zadache proektivno invariantnogo opisaniya ovalov s simmetriyami trekh rodov [A projective invariant description of ovals with three possible symmetry genera]. *Vestnik RFFI [RFBR Information Bulletin]*. 2016. V. 92 (4). P. 38–54. (in Russian). <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2016-092-04-38-54>
- Nikolaev P.P. Raspoznavanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. X. metody poiska okteta invariantnykh toчек kontura ovala – itog vklucheniya razvitoi teorii v skhemy ego opisaniya [Recognition of projectively transformed planar figures. X. Methods for finding an octet of invariant points of an oval contour – the result of introducing a developed theory into the schemes of oval description]. *Sensornye sistemy [Sensory systems]*. 2017. V. 31 (3). P. 202–226. (in Russian).
- Nikolaev P.P. Raspoznavanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. XII. O novykh metodakh proektivno invariantnogo opisaniya ovalov v kompozitsii s lineinym elementom ploskosti [Recognition of projectively transformed planar figures. XII. On new methods for projectively-invariant description of ovals in composition with a linear element of a plane]. *Sensornye sistemy [Sensory systems]*. 2019. V. 33 (1). P. 15–29. (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0235009219010104>
- Nikolaev P.P. Raspoznavanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. XIV. novye metody proektivno invariantnogo opisaniya ovalov s privilecheniem h-polyary i dualnykh toчек [Recognition of projectively transformed planar figures. XIV. New methods for projectively-invariant description of ovals, using an h-polar curve and dual points]. *Sensornye sistemy [Sensory systems]*. 2020. V. 34(3). P. 226–253. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0235009220030063>
- Ovsienko I.Ju., Tabachnikov S.L. Proektivnaya differentsial'naya geometriya. Staroe i novoe: ot proizvodnoi Shvartsa do kogomologii grupp diffeomorfizmov [Projective differential geometry. Old and new from the schwarzian derivative to the cohomology of diffeomorphism groups]. Moscow, MCNMO. 2008. 280 p. (in Russian).
- Savchik A.V., Nikolaev P.P. Metod proektivnogo sopostavleniya dlya ovalov s dvumya osobymi tochkami [Projective correspondence method for an oval with two fixed points]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*. 2018. № 1. P. 40–47. (in Russian).
- Brugalle E. Symmetric plane curves of degree 7: Pseudo-holomorphic and algebraic classifications. *Journal für Die Reine und Angewandte Mathematic (Crelles Journal)*. 2007. V. 612. P. 1–38. <https://doi.org/10.1515/CRELLE.2007.086>
- Itenberg I.V., Itenberg V.S. Symmetric sextics in the real projective plane and auxiliary conics. *Journal of Math. Sciences*. 2004. V. 119 (1). P. 78–85. <https://doi.org/10.1023/B:JOTH.000008743.36321.72>
- Faugeras O. Cartan's moving frame method and its application to the geometry and evolution of curves in the euclidean, affine and projective planes. Joint European-US Workshop on Applications of Invariance in Computer Vision. Berlin, Heidelberg. Springer, 1993. P. 9–46.
- Hauer M., Jüttler B. Projective and affine symmetries and equivalences of rational curves in arbitrary dimension. *Journal of Symbolic Computation*. 2018. V. 87. P. 68–86. <https://doi.org/10.1016/j.jsc.2017.05.009>
- Hann C.E., Hickman M.S. Projective curvature and integral invariants. *Acta Appl. Math*. 2002. V. 74 (2). P. 177–193. <https://doi.org/10.1023/A:1020617228313>
- Hoff D., Olver P.J. Extensions of invariant signatures for object recognition. *J. Math. Imaging Vision*. 2013. V. 45. P. 176–185. <https://doi.org/10.1007/s10851-012-0358-7>
- Lebmeir P., Jurgen R.-G. Rotations, translations and symmetry detection for complexified curves. *J. Computer Aided Geometric Design*. 2008. V. 25. P. 707–719. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2008.09.004>
- Musso E., Nicolodi L. Invariant signature of closed planar curves. *J. Math. Imaging and Vision*. 2009. V. 35 (1). P. 68–85. <https://doi.org/10.1007/s10851-009-0155-0>
- Olver P.J. Geometric foundations of numerical algorithms and symmetry. *Appl. Alg. Engin. Comp. Commun*. 2001. V. 11. P. 417–436. <https://doi.org/10.1007/s002000000053>
- Sanchez-Reyes J. Detecting symmetries in polynomial Bezier curves. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2015. V. 288. P. 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.04.025>

УДК 004.932.4

## АППАРАТНАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ И ТОЧНОСТЬ НЕЙРОСЕТЕВОГО ШУМОПОДАВЛЕНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ КАК ФУНКЦИЯ ОБЪЕМА ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ

© 2021 г. Н. И. Попов<sup>1,2,\*</sup>, А. С. Григорьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет),  
141701 Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН,  
127051 Москва, Большой Каретный переулок, д. 19, Россия

\*E-mail: popov.n@phystech.edu

Поступила в редакцию 06.10.2020 г.

После доработки 15.10.2020 г.

Принята к публикации 02.11.2020 г.

Данная работа представляет собой исследование нейросетевого подхода к улучшению изображений (повышению экспозиции и устранению шума), предложенного в работе (Chen et al., 2018). Анализируется применимость нейросети, обученной на датасете с одной фотокамеры, к данным с другой камеры. Исследуется возможность снижения размера датасета для обучения нейросети для новой камеры. Был собран датасет из 27 пар фотографий в сыром формате, сделанных с экспозициями в 0.01 и 1 с и соответствующих друг другу попиксельно. Путем тестирования на наборах фотографий с разных камер, использующих одинаковый тип мозаики цветочных фильтров, сравниваются две модели, обученные на наборах, размеры которых отличаются в 8 раз. Из зависимости метрик качества PSNR и SSIM от размера обучающего набора выяснено, что для размера в 25–30 сцен метрики превосходят 90% от значений, заявленных авторами вышеупомянутой статьи для модели, обученной на 160 сценах. Также эти метрики сравниваются для модели, обученной на фотографиях с одной камеры, и модели, обученной на фотографиях с новой камеры, после их тестирования на наборе из фотографий со второй камеры. Демонстрируется такая переносимость результата, что качество деталей на изображениях для модели, обученной на относительно большом датасете из фотографий с другой камеры, заметно лучше.

*Ключевые слова:* обработка изображений, нейросетевое шумоподавление, вычислительная фотография

DOI: 10.31857/S0235009221010078

### ВВЕДЕНИЕ

Фотосъемка темных сцен, как и фотосъемка с короткой экспозицией, обладают неудовлетворительным качеством из-за наличия шума, неверного отображения цветов и недостаточной яркости изображения. В частности, шумоподавление изображений было в центре внимания многих исследований в области компьютерного зрения и обработки изображений. Классические методы, такие как анизотропная диффузия (Perona et al., 1990) и использование вейвлетов (Simoncelli et al., 1996), преобразуют шумный вход в качественное изображение и работают в предположении, что сигнал и шум подчиняются некоторой статистической закономерности. Несмотря на то что эти параметрические модели просты в использовании, они ограничены в своих возможностях. Это привело к повышенному интересу к методам, ис-

пользующим похожие участки изображения, таким как BM3D (Dabov et al., 2007). Переход от простых аналитических методов к подходам, основанным на извлечении закономерности из данных, продолжался путем использования словарей для обучения и алгоритмов поиска базисов, таких как KSVD (Aharon et al., 2006). Примерно с 2009 г. большинство алгоритмов шумоподавления одиночных изображений полностью основаны на данных и состоят из глубоких нейронных сетей, обученных удалять шум с изображений (Gharbi et al., 2016; Guo et al., 2019; Zhang et al., 2017).

Тогда как в классических работах шум на изображениях представляется пуассоновским, гауссовым (Foi et al., 2008) или по модели Яне (Bernd, 2005), в современных подходах, основанных на данных, шум создается генеративно-состязательной сетью (Kim et al., 2019). Также существуют решения, в которых используются пары изображе-

ний с реальным шумом и без него. Такой датасет может быть получен путем сбора данных, состоящих из пар фотографий, одно из которых снято с короткой экспозицией и поэтому шумное, а другое — с долгой экспозицией и поэтому в значительной степени без шума (Anaya, Barbu, 2014; Plotz, Roth, 2017). В качестве зашумленных изображений также могут быть использованы фотографии, сделанные при слабом освещении (Chen et al., 2018; Hasinoff et al., 2016; Zhang et al., 2019).

В недавних работах (Lehtinen et al., 2018) предлагается использовать несколько зашумленных изображений одной и той же сцены в качестве обучающих данных вместо парных изображений с шумом и без него, но это не значительно облегчает трудоемкость сбора датасета. Иным новаторским подходом является использование нейросетевой архитектуры GAN, которая может быть обучена без пар изображений с низким и высоким уровнями шума, но которая хорошо обобщается на различных реальных тестовых изображениях (Schwartz et al., 2019; Ren et al., 2019).

Современные методы обработки сырых изображений с сенсора фотокамеры состоят из нескольких этапов, преобразующих интенсивность изображения, тем самым осуществляя изменение входного шума и получение конечного изображения из измерений сенсора. Работа (Nam et al., 2016) определяет ограничения традиционной модели шума и в ней рассмотрены модели для удаления шума с sRGB изображений. Такой же подход используется в работе (Wang et al., 2019), где нейросетевая модель вычисляет коэффициенты, умножение которых на значения пикселей исходного шумного изображения по трем каналам приводит к шумоподавлению. Мы же сосредотачиваемся на шумоподавлении сырых (raw) изображений. В данной работе изучаются точность нейросетевого шумоподавления на изображениях в зависимости от объема обучающих данных и аппаратная независимость (применение модели для одной камеры после обучения на другой) по методу работы (Chen et al., 2018).

## МЕТОД НЕЙРОСЕТЕВОГО ШУМОПОДАВЛЕНИЯ

В статье (Chen et al., 2018) решалась проблема улучшения фото при фотографировании темных сцен с короткой экспозицией при помощи end-to-end нейросетевой модели с архитектурой U-net. Модель обучается на парах фото в raw формате с короткой и долгой экспозициями. На каждой итерации обучения из произвольно выбранного участка изображения составляется тензор, состоящий из четырех слоев, каждый из которых соответствует одному из компонентов байеровской мозаики. После вычитания уровня черного (темнового тока) и умножения на отношение экспо-

зиций двух фотографий одной сцены, находящейся в пределах от 100 до 300, полученный тензор подается на вход сети. Результатом работы модели является sRGB изображение, улучшенное относительно входного, с качеством, оцениваемым по средней L1-норме попиксельной разности между ним и фотографией с долгой экспозицией. Путем обучения этой нейросети на собранном датасете из 424 пар фотографий авторы получили модель, которая удаляет шум, повышает яркость фотографии и демонстрирует качество (метрики качества PSNR/SSIM = 28.88/0.787), не сильно проигрывающее последующим работам (Wang et al., 2019; Schwartz et al., 2019; Guo et al., 2019) в данном направлении. Данный подход превосходит классические методы, использующие серии фотографий (Hasinoff et al., 2016; Liu et al., 2014), которые могут не сработать при крайне низком освещении, как отмечают авторы работы (Chen et al., 2018). Набор данных содержит изображения как внутри помещений, так и снаружи, причем последние фото, как правило, снимались ночью, при лунном свете или при уличном освещении. Несмотря на то что фото с долгой экспозицией могут содержать некоторый шум, их воспринимаемое качество достаточно высоко, чтобы эти изображения служили эталоном качества. В статье рассматривались две камеры с соответственно различными типами мозаики цветных фильтров (Байер и X-Trans), и проведены предварительные эксперименты на фотографиях с iPhone 6S, показывающие потенциальную переносимость данной модели между различными камерами.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В этом контексте анализируется применимость нейронной сети, уже обученной на сравнительно большом датасете с одной фотокамеры, к данным с другой камеры и возможностью снижения требований к размеру датасета для обучения модели для новой камеры. При использовании датасетов особое внимание уделяется попиксельному соответствию фотографий, соответствующих одной сцене, что критически важно для корректного обучения модели. Архитектура сети в трех ниже описанных экспериментах не меняется и соответствует архитектуре, выбранной в работе в качестве оптимальной (Chen et al., 2018).

В данной работе было сделано сравнение качества работы двух моделей, первая из которых обучена авторами статьи (Chen et al., 2018) на наборе из 320 пар фото (датасет “See-in-the-Dark”), сделанных на камеру Sony A7SII, а вторая — на случайной выборке из этого набора размером 40 пар фото. При этом для каждой сцены в обучающем датасете присутствуют два фото с короткой экспозицией и одно фото с долгой экспозицией,

**Таблица 1.** Метрики качества работы нейросетевой модели для разных обучающих и тестовых наборов

(PSNR/SSIM)	Обучение на Sony A7SII (160 сцен)	Обучение на Sony A7SII (20 сцен)	Обучение на Sony A5100 (20 сцен)
Тестирование на Sony A7SII (50 сцен)	28.62/0.78	24.50/0.67	—
Тестирование на Sony A5100 (12 сцен)	28.17/0.85	29.69/0.85	—
Тестирование на Canon 6D (65 сцен)	25.42/0.80	25.79/0.78	—
Тестирование на Sony A5100 (7 сцен)	27.40/0.82	—	30.06/0.83

образующих две пары. Эти модели после обучения тестируются на наборах фотографий с разных камер, но с сенсорами одного типа Bayer: той же камеры Sony A7SII, Sony Alpha A5100 и Canon 6D.

Из количественных результатов, отображенных в первых трех строках табл. 1, можно сделать вывод, что при применении двух рассматриваемых моделей на фото с новых камер метрики качества либо ухудшаются незначительно в сравнении с применением для той же камеры, на которой проходило обучение, либо даже улучшаются. Можно заметить, что размер обучающего набора влияет на качество при тестировании моделей на той же камере, чего нельзя сказать о тестировании на новых двух камерах, для которых качество мало отличается, что можно заметить также на рис. 1. Таким образом, при использовании чужого датасета для обучения модели с целью использования на своей фотокамере нет необходимости в большом его объеме (в частности, показано, что при использовании обучающих выборок с размерами, отличающимися в 8 раз, качество для них отличается не более, чем на 6%).

Для получения зависимости метрик PSNR и SSIM от размера обучающего набора был проведен следующий эксперимент. Упомянутая выше нейросеть была обучена на наборах разного размера из пар фото, случайно выбранных в датасете

для камеры Sony A7SII. Для каждого из размеров выборки, относительно небольших по сравнению с размером авторского обучающего набора в работе (Chen et al., 2018), модель обучалась на данной выборке, после чего она тестировалась на авторском тестовом наборе для той же камеры. Затем были вычислены две метрики качества между результатами работы сети и соответствующими фото с долгой экспозицией путем усреднения этих показателей по всем таким парам.

Для выполнения следующего эксперимента был собран датасет из 27 пар фотографий в сыром формате, сделанных на камеру Sony A5100. Каждой сцене в нем соответствует фотография с короткой экспозицией в 0.01 с и фотография с длинной экспозицией в 1 с, которые соответствуют друг другу попиксельно (камера оставалась неподвижной). Просмотр датасета доступен по ссылке <https://rb.gy/kmt6ar>.

В рамках данной работы сравниваются модель, обученная авторами статьи (Chen et al., 2018) на фотографиях с камеры Sony A7SII, и модель, обученная на фотографиях с новой камеры Sony A5100. Критерием сравнения является качество работы на тестовом наборе из фотографий, сделанных на Sony A5100.

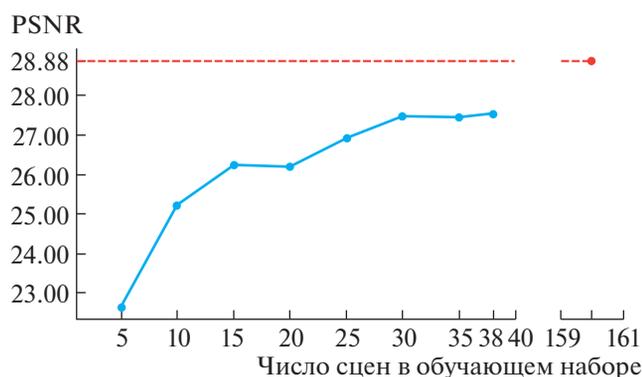
Результаты этого сравнения, приведенные в нижней строке табл. 1 и на рис. 2, демонстрируют



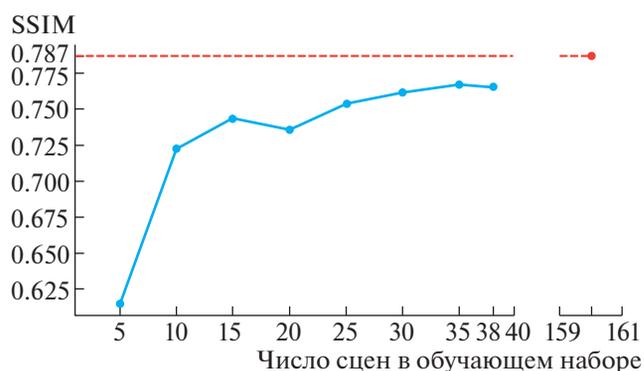
**Рис. 1.** Изображение, сделанное на Canon 6D. *a* – фото с экспозицией 2.5 с; *б* и *в* – результаты работы моделей, обученных на 160 и 20 сценах, сфотографированных на Sony A7SII, получившей на вход фото с экспозицией 0.03 с.



**Рис. 2.** Изображение из собранного на Sony A5100 датасета. *a* – фото с экспозицией 1 с; *б* – результат работы модели, обученной на 160 сценах, сфотографированных на Sony A7SII, получившей на вход фото с экспозицией 0.01 с; *в* – результат работы модели, обученной на 20 сценах, сфотографированных на Sony A5100, получившей на вход то же фото.



**Рис. 3.** Зависимость метрики качества PSNR от размера обучающей выборки при обучении и тестировании на фото с камеры Sony A7SII.



**Рис. 4.** Зависимость метрики качества SSIM от размера обучающей выборки при обучении и тестировании на фото с камеры Sony A7SII.

такую переносимость модели, что, несмотря на более высокие метрики для модели, обученной на фотографиях с той же камеры, на которой проведено тестирование, качество деталей на изображении, созданном моделью авторов статьи (Chen et al., 2018), заметно лучше. Метрики качества во втором эксперименте при размере обучающего набора, равном 25–30 пар фотографий, превосходят 90% от значений метрик, заявленных авторами статьи (Chen et al., 2018) для своей модели, обученной на 160 парах фото (точки красного цвета на рис. 3 и 4, содержащих графики зависимостей метрик от размера обучающего набора). Исходя из этого, можно заключить, что размер обучающего набора в 25–30 пар является достаточным для обучения модели с целью ее применения на той же камере.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение хороших изображений при фотосъемке в условиях недостаточного освещения яв-

ляется трудной задачей из-за низкого отношения сигнала к шуму на изображениях. Способы такие, как фотографирование с долгой экспозицией или использование вспышки, имеют существенные недостатки, например, необходимость в неподвижности камеры для избежания размытий и появление бликов. Съемка в темноте с высокой скоростью в условиях отсутствия света, считается нецелесообразной при использовании традиционных методов обработки сигналов. Предложенный метод демонстрирует успешное подавление шума, а проведенные эксперименты подтверждают переносимость результата статьи (Chen et al., 2018) на новые камеры, заявленную ее авторами, а также определяют примерный диапазон в 25–30 пар фото для уменьшения размеров обучающего набора при незначительной потере в качестве, что выражается в значительном ускорении обучения.

# Hardware independence and accuracy of neural network denoising of images depending on training set size

N. I. Popov and A. S. Grigoryev

<sup>a</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, 171401 Dolgoprudny, Institutskiy Pereulok, 9, Russia*

<sup>b</sup> *Institute for Information Transmission Problems, 127051 Moscow, Bolshoy Karetny per., 19, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: popov.n@phystech.edu*

This work is an investigation of image enhancement (increasing exposure and noise reduction) using neural networks proposed in Chen et al. Learning to See in the Dark (2018). The applicability of a neural network trained on the dataset from a camera to images from another camera and possibility to reduce the size of dataset to train neural network for a new camera are analyzed. A dataset of 27 aligned pairs of raw photos was collected with Exposures of 0.01s and 1s. The model trained on dataset of 320 scenes is compared with the model trained on randomly sampled 40 scenes by testing on photos from multiple cameras with the same type of colour filter. Considering the dependence of such quality metrics as PSNR and SSIM on training set size it was concluded that for the size of 25–30 scenes metrics are greater than 90% of the values claimed by the authors of the above-mentioned article for their model trained on 160 scenes. Also these metrics are compared for the model trained on the photos from the first camera, and model trained on new camera photos after their testing on a set of photos from the second camera. Despite the numerical results (PSNR/SSIM = 27.40/0.82 for the first and 30.06 / 0.83 for the second model) visual comparison of the quality of the details on the images for the model trained on a relatively large dataset from another camera are markedly better that confirms the cross-sensor generalization of the method of the mentioned article, as claimed by its authors.

*Keywords:* image processing, denoising with neural network, computational photography

## REFERENCES

- Aharon M., Elad M., Bruckstein A. KSVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation. *Trans. Sig. Proc.* 2006. V. 54 (11). P. 4311–4322.
- Anaya J., Barbu A. Renoir - a dataset for real low-light noise image reduction. arXiv preprint arXiv:1409.8230. 2014. P. 6.
- Bernd J. Digital Image Processing. 6th revised and expanded edition. ISBN 3-540-24035-7 Springer, Berlin, Heidelberg. New York. 2005.
- Chen C., Chen Q., Xu J., Koltun V. Learning to see in the dark. *CVPR*. 2018. P. 3291–3300.
- Dabov K., Foi A., Katkovnik V., Egiazarian K. Image denoising by sparse 3-d transformdomain collaborative filtering. *TIP*. 2007. V. 16 (8). P. 2080–2095.
- Foi A., Trimeche M., Katkovnik V., Egiazarian K. Practical Poissonian-Gaussian Noise Modeling and Fitting for Single-Image Raw-Data. *TIP*. 2008. V. 17 (10). P. 1737–1754.
- Gharbi M., Chaurasia G., Paris S., Durand F. Deep joint demosaicking and denoising. *SIGGRAPH*. 2016. V. 35 (6). P. 1–12.
- Guo S., Yan Z., Zhang K., Zuo W., Zhang L. Toward convolutional blind denoising of real photographs. *CVPR*. 2019. P. 1712–1722.
- Hasinoff S.W., Sharlet D., Geiss R., Adams A., Barron J.T., Kainz F., Chen J., Levoy M. Burst photography for high dynamic range and low-light imaging on mobile cameras. *SIGGRAPH Asia*. 2016. V. 35 (6). P. 1–12.
- Kim D., Chung J.R., Jung S. Grdn: Grouped residual dense network for real image denoising and gan-based real-world noise modeling. *CVPR*. 2019.
- Lehtinen J., Munkberg J., Hasselgren J., Laine S., Karras T., Aittala M., Aila T. Noise2Noise: Learning image restoration without clean data. arXiv preprint arXiv:1803.04189. 2018.
- Liu Z., Yuan L., Tang X., Uyttendaele M., Sun J. Fast burst images denoising. *ACM Transactions on Graphics*. 2014. V. 33 (6). P. 1–9.
- Nam S., Hwang Y., Matsushita Y., Kim S.J. A holistic approach to cross-channel image noise modeling and its application to image denoising. *CVPR*. 2016. P. 1683–1691.
- Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *TPAMI*. 1990. V. 12 (7). P. 629–639.
- Plotz T., Roth S. Benchmarking denoising algorithms with real photographs. *CVPR*. 2017. P. 1586–1595.
- Ren W., Liu S., Ma L., Xu Q., Xu X., Cao X., Du J., Yang M.H. Low-Light Image Enhancement via a Deep Hybrid Network. *TIP*. 2019. V. 28 (9). P. 4364–4375.
- Schwartz E., Giryes R., Bronstein A.M. DeepISP: Toward Learning an End-to-End Image Processing Pipeline. *TIP*. 2019. V. 28 (2). P. 912–923.
- Simoncelli E.P., Adelson E.H. Noise removal via bayesian wavelet coring. *ICIP*. 1996. V. 1. P. 379–382.
- Wang R., Zhang Q., Fu C., Shen X., Zheng W., Jia J. Underexposed Photo Enhancement Using Deep Illumination Estimation. *CVPR*. 2019. P. 6849–6857.
- Zhang Y., Zhang J., Guo X. Kindling the Darkness: A Practical Low-light Image Enhancer. *CVPR*. 2019. P. 1632–1640.
- Zhang K., Zuo W., Chen Y., Meng D., Zhang L. Beyond a gaussian denoiser: Residual learning of deep cnn for image denoising. *TIP*. 2017. V. 26 (7). P. 3142–3155.

## 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](mailto: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.

Шаблон рукописи в формате doc можно скачать по ссылке: [http://sensorysystems.ru/ru/article\\_submission.html](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/](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 Редколлекцией. 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, межбазный 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 представлены 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: *a*, *b*, *v* 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 Издателя 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 мате-

риалы (аудио- и видеофайлы, презентации, дополнительные таблицы и рисунки и пр.) при условии, если автор является правообладателем прилагаемых 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. Иванов<sup>1</sup>). В английском резюме аффилиации отмечаются латинскими буквами (I.I. Ivanov<sup>a</sup>). Контактный адрес e-mail одного из авторов. Контактный автор в тексте отмечается звездочкой (например, И.И. Иванов<sup>1,\*</sup>). В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov<sup>#</sup>).

– 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<sup>1,\*</sup>, П. П. Петров<sup>1</sup>, С. С. Сидоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Место работы первого автора, 127000 Москва, Один Переулок, д. 19, Россия

<sup>2</sup> Место работы второго автора, 127000 Москва, Другой Переулок, д. 19, Россия

\*E-mail: [author1@mail.ru](mailto: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 не рецензируемые 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<sup>a</sup>).

– Контактный адрес e-mail одного из авторов. В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov<sup>#</sup>).

– 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<sup>a, #</sup>, P. P. Petrov<sup>a</sup>, and S. S. Sidorov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> First Institution, 127000 Moscow, One lane, 19, Russia

<sup>b</sup> Second Institution, 127000 Moscow, Another lane, 19, Russia

<sup>#</sup>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. № I. 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](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.

Вывоз А.Л. *Электрофизиологические исследования сетчатки* [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](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 zhidkosti 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](mailto:editor@sensorysystems.ru) и дублировать на адрес [sensys-li@mail.ru](mailto:sensys-li@mail.ru).

С правилами для авторов можно также ознакомиться по адресу: [http://sensorysystems.ru/ru/article\\_submission.html](http://sensorysystems.ru/ru/article_submission.html)

## **О создании нового электронного архива выпусков научных журналов РАН по тематическому направлению «Химия, биология и физиология» PhysChemBio.ru**

В целях продвижения российских научных журналов, повышения их видимости и доступности в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ создан новый электронный архив выпусков научных журналов РАН по тематическому направлению «Химия, биология и физиология» PhysChemBio.ru

Основой электронного архива по данной тематике стала коллекция выпусков ведущих журналов Российской академии наук за период с 2000 по 2008 год: «Доклады академии наук», «Журнал физической химии», «Физикохимия поверхности и защита материалов», «Радиохимия», «Электрохимия», «Коллоидный журнал», «Нефтехимия», «Журнал прикладной химии», «Высокомолекулярные соединения. Серия А», «Высокомолекулярные соединения. Серия В», «Высокомолекулярные соединения. Серия С». В дальнейшем планируется включение в данный архив как более ранних выпусков, так и других журналов РАН по данному направлению.

Вместе с коллекцией выпусков журналов РАН по химии, биологии и физиологии в архиве также размещаются материалы XXI-го Менделеевского съезда по общей и прикладной химии - ключевого события Международного года Периодической таблицы химических элементов. Материалы съезда включают тезисы участников десяти секций, семи англоязычных симпозиумов. Материалы содержат новые знания в самых передовых областях химии и наук о материалах, тексты и видеозаписи пленарных докладов выдающихся ученых мира.

Архив размещается на сайте **PhysChemBio.ru** и свободный бесплатный доступ к полным текстам статей открыт в декабре 2020 года.

