

СОДЕРЖАНИЕ

Том 36, номер 1, 2022

Зрительная система

An overview of the visual acuity assessment. 2. Theoretical and clinical requirements to the optotypes and chart designs

G. I. Rozhkova, M. A. Gracheva, and A. A. Kazakova 3

Оценка периферической остроты зрения в различных условиях тестирования

A. B. Белокопытов, Г. И. Рожкова, М. А. Грачева 30

Обонятельная система

Экспрессия и функциональная роль сигнальных белков обонятельной, вкусовой и фототрансдукции в бета-клетках островков Лангерганса

Ю. А. Ковалицкая, Н. П. Коваленко, М. Ф. Быстрова 44

Техническое зрение

Распознавание проективно преобразованных плоских фигур.

XVI. Октет проективно стабильных вершин овала и новые методы эталонного его описания, использующие октет

П. П. Николаев 61

Учет гетероскедастичности в измеряемых томографических проекциях при реализации алгебраического подхода в томографической реконструкции

М. В. Чукалина, А. С. Ингачева, А. В. Бузмаков, И. В. Якимчук, И. А. Варфоломеев, П. А. Кулагин, Д. П. Николаев 90

Памяти ученых

Эдуард Петрович Зинкевич 99

Иван Николаевич Пигарёв 100

Правила для авторов журнала “Сенсорные системы” 102

Contents

Vol. 36, No. 1, 2022

Visual system

An overview of the visual acuity assessments. 2. Theoretical and clinical requirements to the optotypes and chart designs

G. I. Rozhkova, M. A. Gracheva, and A. A. Kazakova 3

Assessment of peripheral visual acuity in various conditions of testing

A. B. Belokopytov, G. I. Rozhkova, M. A. Gracheva 30

Olfactory system

The expression and function of components of signaling cascades of taste, olfactory, and phototransduction in mammalian pancreas beta-cells

Yu. A. Kovalitskaya, N. P. Kovalenko, M. F. Bystrova 44

Technical vision

Recognition of projectively transformed planar figures xvi. The octet of projectively stable vertices of the oval and new methods for its reference description using the octet

P. P. Nikolaev 61

Heteroscedasticity correction to improve tomographic reconstruction with an algebraic approach

M. V. Chukalina, A. S. Ingacheva, A. V. Buzmakov, I. V. Yakimchuk, I. A. Varfolomeev, P. A. Kulagin, D. P. Nikolaev 90

E. P. Zinkevich 99

I. N. Pigarev 100

Instructions for authors 102

УДК 617.751-072.7 + 612.84

AN OVERVIEW OF THE VISUAL ACUITY ASSESSMENT. 2. THEORETICAL AND CLINICAL REQUIREMENTS TO THE OPTOTYPES AND CHART DESIGNS

© 2022 г. G. I. Rozhkova^{1,*}, M. A. Gracheva¹, and A. A. Kazakova^{1,2}

¹ Institute for Information Transmission Problems RAS, 127051 Moscow, B. Karetny, 19/1, Russia

² Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, 117997 Moscow, Ostrovityanova st., 1, Russia

*E-mail: gir@iitp.ru

Received July 17, 2021; Revised August 6, 2021; Accepted August 6, 2021

This paper presents analysis and discussion of the test images employed for the visual acuity (VA) assessment – the optotypes – and their distributions in the test charts. After brief description of the optotype early history and evolution, an attempt has been made to classify the existing optotypes and to analyze directions of their development. The following kinds of the optotypes are considered: letters, uniform configurations, periodic patterns, vanishing images, pictures, and embedded test stimuli. General theoretical and practical requirements to the optotypes are formulated. Specific advantages and disadvantages of certain popular optotypes are discussed in detail. The last section is devoted to the evolution of the charts for the VA assessment and their designs. A general conclusion is that there are no universal “golden standards” for the optotypes and the VA charts: their optimal structure depends on the purpose of investigation, characteristics of the contingent to be examined, and qualification of the examiners. In any case, the examiners have to understand advantages and disadvantages of the chosen tests and take them into account both in planning the procedure and interpretation of the results obtained.

Key words: variety of optotypes, optotype classification, improvement of optotypes, variety of visual acuity charts, visual acuity chart design guidelines

DOI: 10.31857/S0235009222010073

INTRODUCTION

In the first paper of this series (Rozhkova et al., 2021), it was outlined that the complex structure of the human visual system makes it unrealistic to think of finding the best or universal test images for a general visual acuity (VA) assessment. Visual sensory system contains many parallel pathways with various autonomous modules designed for the analysis of specific visual stimuli – various combinations of input signals from our rich visual environment. The optical flows entering the eye in different conditions are very different depending on the parameters of the perceived visual scenes. In most cases, these scenes contain both stationary and moving objects of various sizes, shapes, and spatial positions. Evolutionally, the main principles of developing the animal visual systems were determined by the tasks of surviving: vision had to provide useful information necessary for navigation, feeding, and avoiding dangerous objects. Many of these tasks required fast analysis of the input signals to obtain a proper solution within a limited time interval that guaranteed successful behavioral response. It is evident that sufficiently fast sequential analysis of many heterogeneous data is impossible. Taking into ac-

count a great variability of the natural visual inputs, on the one hand, and essential limitations on the time of their processing, on the other hand, it seems justified that evolution resulted in developing parallel functional modules for simultaneous analysis of different inputs inside a global neuronal visual network.

Regarding the VA assessment, responses to certain visual test stimulus – called optotype – could only reflect the results of this stimulus analysis in the neuronal pathways relevant to processing such types of the stimuli and might be useless for predicting responses to the stimuli of other types. This means that, for comprehensive assessment of the VA, it is necessary to have a sufficient number of different optotypes and it is not clear how many different optotypes are sufficient. Both for theoretical investigation and for clinical work, it is important to minimize this number, however, the history of optometric practice demonstrates quite the opposite tendency. In this paper, we consider the reasons of this discrepancy and some directions of developing modern optotypes.

A proper choice of optotypes is one of the prerequisites to success of any investigation based on the VA measurements. The analysis of the literature available

indicates that dozens of various optotypes are used by ophthalmologists and visual scientists. Moreover, in the cases of certain investigations there is a tendency to use more than one set of optotypes and to compare the results. Such investigations witness that the problem of choosing or creating the optimal optotypes for various scientific researches or clinical works has not yet been solved. It is evident that this problem needs renovation or revision in view of new findings and conceptions: at present, more rigorous criteria should be formulated for the assessment of the optotype quality and usability taking into account our enhanced knowledge, on the one hand, and the tendency to computerize measurements, on the other hand.

EARLY HISTORY OF THE OPTOTYPE INVENTION AND DEVELOPMENT

The necessity of having special test images that could be convenient for a gradual assessment of vision quality became evident since the middle of the 18th century in connection with spreading printed books and newspapers, and eye-glasses for optical correction of vision. To improve the choice of optical correction, it was natural to rely on quantitative assessment of the patient's ability to recognize small objects either by means of increasing the viewing distance to the same objects (first type of the procedure) or by presenting the set of the objects of various sizes at the same distance (second type of the procedure). In particular, the optician could ask the patient to read one and the same fine printed text in conditions of varying distance or to view a set of printed letters (or other objects) of various sizes from the same distance in conditions of changing glasses. According to publications available now, the first procedure was used by an English optician James Auscough (1750) and a French spectacle master Jean Chevallier (1810) (see the reviews by Doria, 2020; 2021). The second procedure was more convenient for practice since it did not require moving the patient from one position to another. In 1835 Heinrich Küchler additionally eased implementation of this procedure by creating the appropriate chart that contained the images of big and small objects and animals pasted onto a sheet of paper in a regular order according to their size (see Wollman, 2020). Developing this idea further, in 1842 Küchler created 3 similar test charts with 12 lines of the German words printed in gothic style and placed them in an order of reducing their height from the top to the bottom of the chart. Thus, these charts provided a possibility to characterize vision quality by the numbers of the lines containing the letters seen clearly or just discernible. These test charts were published in 1843. However, some difficulties with reading the gothic style images of German words hindered spreading these charts. Later, Eduard Jäger used the same principle and created the charts with a larger amount of words in 3 languages – German, French and English –

thus making such charts more widespread (Jäger, 1854).

To speak more precisely, reading of the printed text with different glasses was used not for quantitative assessment of VA *per se* (the notion of VA was not yet formulated) but for choosing the most proper optical correction. Nevertheless, such practice appeared to be also fruitful for developing the VA assessment methods. It had led to realization of the potential benefits from the quantitative characterization of visual abilities and put the task to elaborate proper standardized means and procedures for this purpose.

The key steps in this direction were made by Frans Cornelis Donders and by his co-worker (later becoming his successor) Herman Snellen in the 60-ies of the 19th century (Snellen, 1862; Colenbrander, 2008). Donders (1864) introduced the notion of visual acuity and the unit for its measurement. More practically oriented Snellen (1862) published the first test chart for the VA assessment containing standardized letters specially modified in view of graphic unification of the test images (they were drawn on the 5x5 grid; all the strokes were 1/5 of the letter height/width). Snellen suggested a general term *optotype* for any visual image designed for the VA assessment. At present, this term is mostly used in a special theoretical literature whereas, in descriptions of experimental and clinical investigations, many authors prefer to use its synonyms – test stimulus, object, symbol, target, sign, pattern, – probably, because these synonyms have more direct associations with the measuring procedures.

Noteworthy that, in some prototypes of his famous test chart, Snellen considered a possibility to use not only letters but also various simple abstract shapes: circles, squares, 2-bar and 3-bar configurations, etc. (see Figures from the University Museum in Utrecht reproduced in the paper of Colenbrander (2008)). Those shapes might be more appropriate for mathematical description and theoretical analysis. However, for practical reasons, Snellen eventually preferred letters¹. Indeed, some practical reasons were evident. The Küchler's and Jäger's charts with printed words were already familiar to opticians, and observers had even less difficulties with response to the test letters than to words. Therefore, the Snellen's chart with letters could be adopted as an understandable simplification and improvement of the previous charts. In contrast, the charts with the abstract shapes could require some additional time for familiarization and for obtaining consistent responses from the observers, thereby prolonging examination and making it more difficult.

It was not surprising that Snellen's preference for letters exerted an impressive and fast positive influ-

¹ From a recent short essay on the history of optotypes (Wallman, 2020): "Snellen's first charts consisted of dingbats (squares, circles, plus signs, etc.) but he eventually decided that letters would be easier to identify and describe consistently."

ence on optometric practice but had long lasting negative influence on theoretical analysis of the optotype perception and improvement.

Luckily, at that period of time, the whole vision science reached significantly higher level of development. Hermann von Helmholtz and Emile Javal invented several very important ophthalmic instruments providing essential progress in investigations of the eye structure, understanding normal physiology of the eye, and performing more fine diagnostics of the eye pathology. Thanks to these instruments, the clinicians had got a possibility to assess impairment of refraction and accommodation of the eye as well as certain retinal anomalies. The appearance of such fundamental monographs as Donders's *On the Anomalies of Accommodation and Refraction of the Eye* (published in 1864) served as an impulse for vision scientists to carry out more profound analysis of the eye functioning and to develop new approaches for an accurate assessment of basic visual functions and abilities.

In 1875 Ferdinand Monoyer (Monoyer, 1875) proposed a new chart and a new notation for the VA assessment. Though the chart did not become popular, the measure proposed is used until now. A novel notation of the VA was based on the minimum angle of resolution and was named *decimal notation*.

The next important achievement on the way to the standardized quantitative assessment of the VA was the invention of a special non-letter optotype by Edmund Landolt (1888). It has an annular shape with one small gap in the contour ("broken ring"). Later, such image was named Landolt C. In the modern test sets, there are usually 4 or 8 Landolt Cs with 4 or 8 different positions of the gap, respectively. From theoretical point of view, the remarkable property and the main attractive feature of such sets is a general uniformity of the optotypes in the set: these optotypes can only be distinguished on the basis of a single parameter – the gap position.

In 1889 there was published a chart with one more set of the optotypes having such a property – the set of short-stroke E-letters in four orientations. These optotypes are similar to the so called tumbling E optotypes (Taylor, 1978) considered as of non-letter type. Though configurations of all the optotypes in the set correspond to the letter E, three of them have the orientations not inherent to the Latin letters. Like in the case of the Landolt Cs, in the case of the set with four E-shaped optotypes of different orientations (with the three parallel lines directed up, down, to the left, and to the right), recognition of the presented test optotype is also based on one parameter – the orientation. However, this property of tumbling E was not appreciated at the time of its invention, it was only outlined that such optotypes could be good for examination of the illiterate individuals since the required response implied indication of the image orientation but not telling the letters.

During the interval of about 50 years after the Landolt C invention, there were no principal innovations in creation of the optotypes but, later, several branches of parallel development appeared to be growing rather rapidly and led to a fast increase in the amount of the optotypes and the methods of their presentation available in modern practice. As an illustration, some examples of such products are shown in Figure 1. Because of their multiplicity and variability, it is not rational to describe here when, why and by whom each specific optotype was introduced. It seems more useful to give a general description of developmental branches and classification of the optotypes used at present.

VARIETY OF OPTOTYPES AND THEIR CLASSIFICATION

This section presents the results of our attempt to determine the main directions of the optotype evolution (improvement) and to classify them on the basis of their critical properties. The appearance of the new test images over the time and the configurations of the optotypes used nowadays are presented schematically in Figure 2. It includes both the widespread traditional optotypes and some more specific optotypes proposed recently. Each configuration has also various other modifications not shown in this figure.

Retrospectively, in evolution of the optotypes, it is reasonable to separate six branches:

(1) Letter optotypes: Snellen letters (1862) – Green letters (1868) – Sloan letters (1959) – Filtered letter images – Vanishing letters on gray background;

(2) Uniform optotypes – the identical shapes in variable orientation: Landolt C (1888) – Tumbling E – 3-bar targets;

(3) Periodical patterns: Black-white gratings with sharp bars – (Teller preferential looking test charts) – Checkerboard patterns – Sinusoidal gratings – Gabor patches – Modified 3-bar targets;

(4) Vanishing optotypes: Cardiff test – Koskin Cs – Auckland optotypes – Moorfields letters (2016);

(5) Pictorial images: Allen Preschool test (1957) – Orlova's chart – Rossano images (purely pictorial images, contour and silhouette images, images composed of grating patches, etc.);

(6) Embedded images: the test stimuli included as the insets into a larger figures (like Landolt C in "Broken wheels") or drawn over a surrounding image serving as a background.

This categorization is based on the characteristic features of the optotype shape, on the one side, and on the observer's responses implied by the instruction, on the other side. It is not always easy to determine belonging of an optotype to certain category and sometimes the solution is ambiguous since certain optotypes have such properties that they could be considered as the features of some two or even three



Fig. 1. Examples of various optotypes for the VA assessment. Fragments of the tests emerged over the time.

categories. For instance, 3-bar targets included into the category of the uniform optotypes can also be considered as periodic patterns; Cardiff test images can be treated both as vanishing and pictorial optotypes; etc. There are also some other varieties of the optotypes that have no direct relation to any of the described categories. It is impossible to analyze the whole variety of

optotypes in detail and it is not the purpose of this paper. After a brief comment on each branch of the optotypes, we'll consider some general problems of their usage and development.

– *Letter optotypes*. As a rule, these optotypes have rather complex shapes. In general, each letter contains

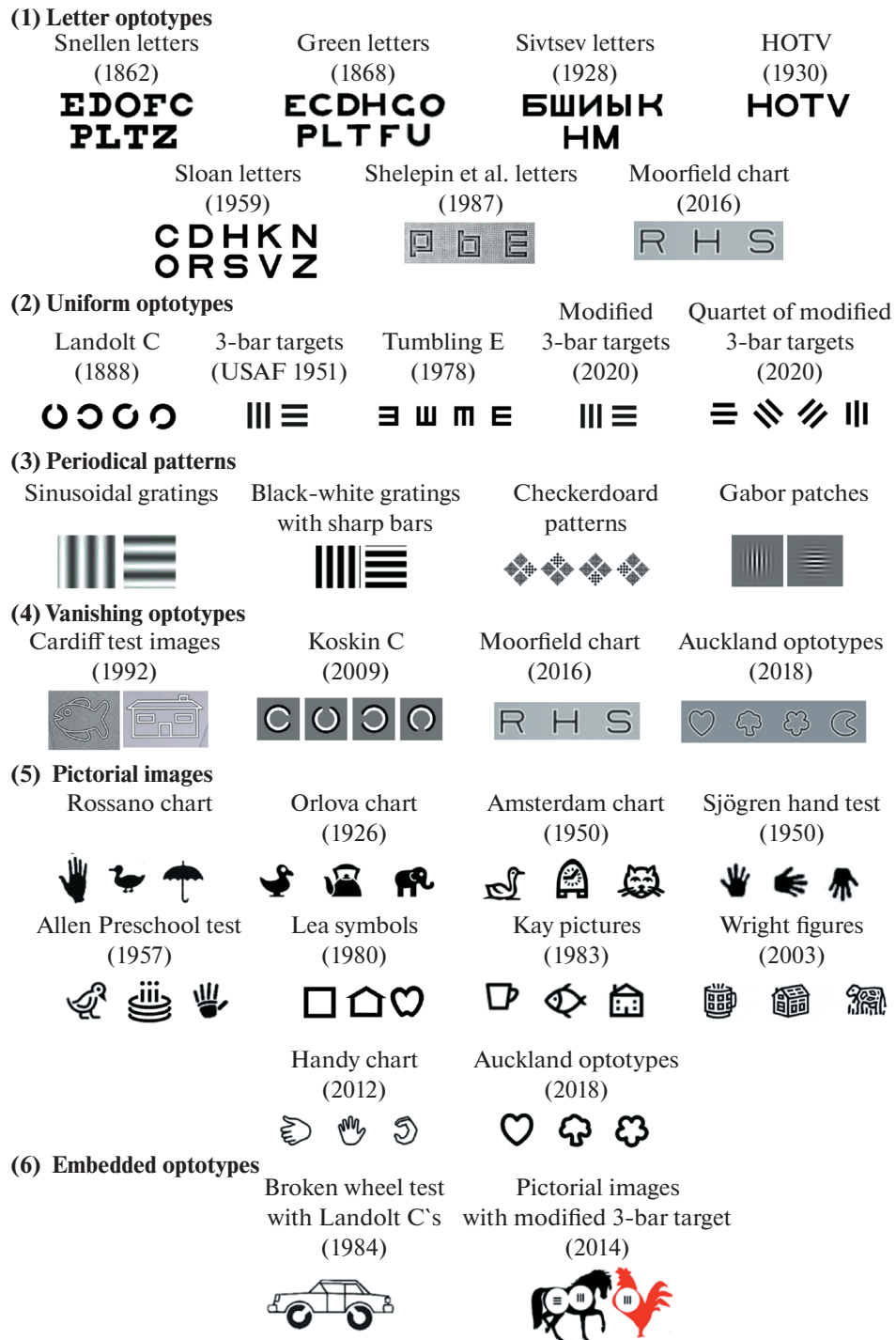


Fig. 2. Various branches of optotype development.

several components of different size and curvature. The observer's task is usually one and the same: to recognize the presented letter. As was mentioned above, the first letter-like test images specially designed for quantitative assessment of the VA were Snellen letters. Though these images looked like ordinary letters used by opticians earlier in the charts with printed words,

one could notice two principal achievements. (1) Configurations of Snellen letters were standardized: all of them were drawn on 5×5 grid and had one and the same stroke width of 1 grid element. Since Snellen had the idea that letters should contain maximum possible number of details of one-element size, he preferred capital letters with serifs of "Egyptian Paragon" text

style. (2) The sizes of Snellen letters were scaled in relation to the optotype with the one-minute angular size of the stroke width. The original set of these letters met the one-minute criterion at the distances 20, 30, 40, 50, 70, 100, and 200 feet.

Somewhat later, John Green proposed radical changes in the style of the letter optotypes and the gradations of size. Thinking of equal legibility of the test letters, he wrote: "...in selection of letters for tests of vision, it is important to choose those which are most nearly uniform in size and character..." (Green, 1868, p. 69). Proceeding from this idea, Green used the letters of less complex, sans-serif style and discarded 12 letters of the alphabet, which could not be drawn on 5×5 grid, as well as certainly peculiar letters I, J and Q.

The next important step in use of the letter optotypes for the more accurate VA assessment was made by W.S. Dennett who had found that the threshold distances for recognizing different sans-serif letters of equal height were essentially different: e.g., for the letter height of 2.5 cm, these distances were varying between 10.3 and 17.7 meters (Dennett, 1886; Linksz, 1972). In his report, Arthur Linksz wrote:

"...Such discrepancies obviously proved that the height of the letters in itself, even if expressed in terms of visual angle, is a poor measure of visual acuity. Dennett found that among the letters investigated there were eight – P, Z, K, R, N, G, C, and F – the legibility of which averaged between 13.0 and 13.7 meters.

Applying these findings, Dennett constructed a new chart in which the individual lines did not contain letters of equal height. His five-meter line consists of letters readable at five meters, not of letters having a certain angular dimension at five meters." (Linksz, 1972, p. 321).

The other letter set, the Sloan's test letters are widely used in clinical practice nowadays, for example, in ETDRS chart, in Freiburg test, in Moorfields acuity chart, etc. The set consists of 10 letters (Z, N, H, R, V, K, D, C, O, S) designed similarly to Green's letters and chosen on the basis of nearly equal legibility (on author's opinion based on the VA measurements in 234 eyes) (Sloan, 1959).

In regard to a general appreciation of the letters as the optotypes, it's reasonable to cite more than a century-old opinion of a famous ophthalmologist who had performed a well-known classic investigation of peripheral vision:

"...letter symbols, although indispensable in ophthalmic practice, are the least suitable for accurate experiments. The different degrees of recognizability of various letters, and the possibility of guessing the whole from recognizing some of its parts, are known disadvantages of such testing material." (Wertheim, 1894, Translation of I. L. Dunskey: Wertheim, 1980, p. 916).

Nevertheless, up to date, many ophthalmologists believe that the test charts with letters can be used as "a golden standard" for precise VA measurement. Probably, at least one more century is needed for rethinking and changing this opinion.

– *Uniform optotypes*. The idea of using the optotypes having identical shapes but different orientation belongs to Landolt (1888). A famous Landolt's test images, now known as Landolt C optotypes, look like broken rings identical in all respects except a small break (gap) at different positions of the ring. The observer's task is to indicate the position of the gap in the presented test image. In 1909, XI International Ophthalmological Congress adopted Landolt ring as the standard test object. At present, Landolt C is still recommended as the standard optotype despite its disadvantages revealed during the last decades. These disadvantages are of the two different kinds: firstly, it is not easy to interpret the results of the VA assessment based on Landolt Cs in terms of the critical parameters of the test image (Bondarko, Danilova, 1997); secondly, there are evident limitations in presenting small images of circular shape on displays having square pixels: there appear distortions that reduce the accuracy of the VA measurements with Landolt Cs by means of computer technique.

Other uniform optotypes introduced later – tumbling E (or illiterate E) and 3-bar targets – share their main advantages with Landolt C. Certain disadvantages of such uniform optotypes were not clearly understood until the analysis of their two-dimensional Fourier spectra was performed (Anderson, Thibos, 1999a, b; Rozhkova et al., 2012, 2017). In particular, such analysis has revealed that these uniform optotypes can be recognized on the basis of the spatial-frequency components of their Fourier spectra that are much lower than the characteristic frequency F_c corresponding to the smallest elements of the test image and presumably determining the true VA. This does not mean that it is impossible to create uniform optotypes of better quality, for instance, by means of modifying configurations of certain "imperfect" uniform optotypes in the test set to exclude the possibility of their distinguishing on the basis of the rough image features but not of their fine structure.

The investigations aimed at assessment of the contribution of the low-frequency Fourier components to the optotype recognition and the attempts to improve the uniform optotypes are considered below in a separate section.

– *Periodical patterns*. It is noteworthy that the patterns of this type were proposed for a quantitative VA measurement even earlier than Snellen letters (Jaeger, 1854). Test images, presented by E. Jaeger in his book, were regular groups of black bars separated by white interspaces of identical width. The task was to determine the maximum distance at which the white interspaces in a given test group of bars could be seen and

counted. This method is closely corresponds to contemporary methods based on resolution of spatial gratings with sharp contours of bars.

Unfortunately, Jaeger's invention remained practically unnoticed, evidently not only because of its improper publishing as an appendix to the book devoted primarily to cataract and its surgery, but also because vision specialists were not ready to accept such test images at that time. At present, the advantages of gratings for accurate VA measuring, are clear to all the scientists carrying out theoretical investigations of visual processing and to all ophthalmologists using objective methods of the VA measurements (such as interference method of measuring retinal VA bypassing eye optics; method of visual evoked potentials, etc.). However, it is not so easy to apply periodic patterns in the framework of traditional VA measuring methods implying presentation of charts. Luckily, there are remarkable alternative solutions – such as Teller's and Vital-Durand's charts for infants or computer-aided methods based on finding the highest perceived spatial frequency in the course of contrast sensitivity assessment as a function of spatial frequency (Westheimer, 1972).

– *Vanishing optotypes.* The term *vanishing optotype* was suggested for the VA test targets with a peculiar property of equal detection and resolution thresholds (Frisén, 1986). In the experiments of Frisen, test letters of varying contrast generated on a television monitor were studied with regard to detection and resolution thresholds, both for the native configurations and after high-pass spatial frequency filtering. Such filtering reduced the interval between detection and resolution thresholds and could result in disappearance (vanishing) of the test target at the stimulus level when it became unrecognizable.

In later works, instead of the true high-pass filtering, some pseudo high-pass filtered images and certain test images with complex structure of the contours were mostly employed to provide the desired property of the image vanishing at recognition threshold. A pseudo high-pass design is characteristic of the letter VA charts. Such charts came into use soon after the time of the vanishing optotype appearance and were applied later in many investigations (Koskin et al., 2007; Koskin, 2009; Shah et al., 1996; 2010, 2011, 2016; Anderson, 2017; Wen et al., 2021; Moiseenko et al., 2020; etc.)

Complex contours are mainly used in the VA tests for children and illiterate adults. One of the examples is a widespread Cardiff Acuity Test for 1-3-years-old children (Fariza et al., 1990). It includes the images of 6 objects on gray background with triple contours consisting of the central white line and two twice thinner black lines on both sides of it. The parameter varying to find the threshold is the line width but not the test object size. Examination procedure is based on the preferential looking method (Teller, 1979): the child

usually keeps her/his gaze at the half of the sheet where he/she sees the test object (the other half is a homogeneous gray field).

Vanishing optotypes appeared to be good not only for testing children but also for detailed medical examination of the patients inclined to simulate incorrect results (Koskin, 2009) and for improving differential ophthalmic diagnostics in clinic (Anderson, 2017). In scientific investigations, vanishing optotypes are mainly presented by Gabor patches – the fragments of sine-wave gratings with Gaussian envelope. When, with decreasing size, the Gabor patch structure became indiscernible, the patch could vanish (became invisible) if its average lightness/brightness was equalized with lightness/brightness of the grey background. Unfortunately, the effect of vanishing is rather sensitive to the parameters of test images and background; this shortage restrains spreading of vanishing optotypes. Nevertheless, the interest to the charts with vanishing optotypes is growing, especially in clinical investigations (Shah et al., 2016; Anderson et al., 2017; Hamm et al., 2018a, b; Moiseenko et al., 2020).

As an alternative to the optotypes that are vanishing completely, one could consider the optotypes with vanishing structure: they became not invisible but unrecognizable when their fine components became undistinguishable with decreasing size. In other words, the sets of such optotypes consist of certain black-white patterns on white background that can transform into uniform grey spots or more complex vague configurations having one and the same shape. The examples of such optotypes are the modified 3-bar targets (perceiving at threshold as identical blurred square spots) proposed in 2012 (Lebedev et al., 2012; Rozhkova et al., 2012; Lebedev, 2015) and the special variety of the Auckland optotypes perceiving at threshold as indistinguishable blurred rings (Hamm et al. 2018 a, b; 2019).

– *Pictorial images.* Schematic drawings of simple objects (either of silhouette or contour type) were introduced into optometric practice for VA assessment in children and illiterate adults in parallel with creating the VA charts containing abstract configurations. As was mentioned above, according to recent historical evidence (Wollman, 2020), Heinrich Küchler had used pictorial images as early as in 1835 in his first chart (not published) that served as a prototype for his later charts with German words printed in gothic letters, and for many other charts. At present, the most common are Orlova's silhouette objects (for the first time, the chart was published in Russia in 1926); Allen pictures (Allen, 1957; published in the USA in 1957 for the first time); Kay pictures (Kay, 1983; published in England in 1983); Lea symbols (Hyvärinen, 1980); Broken wheel test of Richman (1984); BAST test.

The process of upgrading pictorial images was aimed at making them closer to the standard images and more convenient for an accurate assessment of

VA. For instance, it was true of the test images elaborated by Lea Huvarinen who tried to create a standardized pictorial test set (Huvarinen, 1980) providing good reproducibility of results. The four Lea symbols named “ball”, “apple”, “square” and “house” are actually simple contour configurations. They are made symmetrical to avoid left-right errors in responses, and are drawn with the thinner lines (in comparison to most standard optotypes) to make their threshold blurred images more difficult to distinguish. Although the proportion between the line width and the whole optotype width is not 1:5 as in the recommended standard, Lea symbols proved to be well suited for quantitative VA assessment in children. Because of the thinner lines, Lea symbols were made larger than other comparable standard optotypes for the same VA level.

– *Embedded images.* Since small abstract optotypes are often not interesting for children, some researchers embedded these test images inside significantly larger and more attractive figures in order to direct attention of the examined child to the needed optotype. The most widely known example of such an approach is the Broken wheel test in which the optotypes – the Landolt Cs – are incorporated into the images of the cars instead of their wheels. A series of charts with embedded the 3-bar stimuli was created in 2014 (Rozhkova et al., 2014).

In conclusion of this section, it is useful to repeat that the categorization presented here is far from being perfect: many optotypes have “mixed” properties characteristic of two-three categories. However, in most cases, the main feature determining the choice of category is salient. It is noteworthy that, in all branches of the optotype evolution, one could notice a tendency to modify the initial test images in a way allowing use them as vanishing optotypes.

GENERAL PRINCIPLES OF THE OPTOTYPE FUNCTIONAL QUALITY ASSESSMENT

There are many fine papers describing history of developing new optotypes and introducing them in practice of VA assessment (Linksz, 1972; Colenbrander, 1988, 2008; Kniestedt, Stamper, 2003; Doria, 2020; 2021; and oth.). However, one could find not so many studies devoted to a general analysis that could provide a basis for comparative estimation of different optotypes as concerned their functional essence, potential possibilities, advantages, and disadvantages of their use – the characteristics that could be united by the term “functional quality”. A fundamental advancement in this direction of research became only significant after application of the information theory, spatial frequency conception and Fourier transformation to the analysis of processing retinal images in the human visual system (Campbell, Green 1965; Campbell, Robson 1968; Anderson et al., 1996; Anderson, Thibos 1999 a, b; Watson, Ahumada, 2008; 2012; Rozhkova et al. 2012, 2017; Lebedev, 2015).

Most publications on the quality of optotypes present the data of comparative experimental studies with employment of two different optotypes. The results are usually interpreted in terms of “underestimation” or “overestimation” of some hypothetical *true* VA value (Held et al., 1979; Gräf, Becker, 2008; Stiers et al., 2003, 2004; etc.). However, it needs to be emphasized that the VA values obtained by means of different optotypes correspond to different visual capabilities and, therefore, to different true values. As has been outlined in the previous sections, each kind of optotypes measures certain specific capability and, therefore, it is senseless to speak of under- or overestimation without reference to the capability that actually was investigated. In this respect, it seems necessary to perform theoretical analysis of different optotype processing in visual pathways and to elaborate reasonable approach to the optotype choice in different cases.

In scientific literature on the VA measurements, there are many discussions on the issue what visual capabilities are actually estimated by means of different optotypes and vice versa – what optotypes should be used for assessment of certain visual capabilities. However, up to date, in theoretical investigations, but only some partial aspects of the problems concerning this approach have been analyzed successfully since a thorough estimation of the optotype advantages and disadvantages needs taking into account a large number of heterogeneous factors.

The rational way of optimizing the optotypes is to start from clear formulation of the *purposes* and the *tasks* of specific measurements, on one hand, and the visual capabilities actually provided by the neuronal modules and pathways involved in processing different optotypes, on the other hand. This is not a new idea though it is often expressed unclearly and somewhat differently in different papers.

The main purposes of the VA assessment are: (1) visual screening; (2) monitoring of vision in view of age dynamics, development of pathology, assessment of treatment and training effects; (3) standard medical examination; (4) medical examination for professions requiring fine vision; (5) juridical medical examination.

– *Visual screening*, i.e. relatively fast and standardized VA assessment aimed at examination of a large number of people (usually carried out at schools) to reveal the cases of evident visual impairment by comparison of individual VA values with certain population normative values obtained as a result of regular population surveys. On the basis of this comparison, the conclusions are made about the necessity of the more profound investigation, correction and treatment for each examined individual. Screening does not imply precise measurement of the individual’s VA if its value exceeds the normative level.

– *Visual monitoring*, i.e. regular VA assessment with high accuracy. Population VA monitoring is necessary

for optimizing a general vision care system. Regional monitoring data may provide information on the effect of various social, technological and ecological factors. Individual VA monitoring is aimed at controlling visual development, providing early diagnostics, estimating the efficiency of treatment.

– *Standard medical examination* implies an accurate assessment of VA by means of special methods in view of differential diagnostics in the cases of rare diseases or the necessity to exclude simulation in the cases when “inhonest” participants try to demonstrate reliable results corresponding to the lower or higher VA in order to gain certain benefits.

– *Medical examination for professions requiring fine vision*, i.e. assessment of VA by means of methods corresponding to certain professional activity in order to decide if the participant examined fits certain professional criterion.

– *Juridical medical examination* is aimed, as a rule, at assessment of low and very low vision levels up to blindness in order to determine the type and amount of social support needed to the patient. In the cases of very low vision, use of common methods of VA measuring is impossible and special methods of the patient examination are required.

Among the visual tasks (and corresponding abilities) directly indicated in connection with VA measurements are such as *detection, resolution, discrimination, identification, recognition* (Shamshinova, Volkov, 1999; Heinrich, Bach, 2013). Each of these abilities could be assessed using different experimental paradigms (optotypes, methods of their presentation, algorithm of their size varying and decision making procedure), various illumination levels (photopic, mesopic, scotopic) and different viewing conditions (monocular or binocular presentation, central or peripheral visual field, different stimulus duration, etc.) thus activating different neuronal pathways. As a result, the number of visual capabilities that could actually be assessed in the procedures named as “VA assessment” is rather large and each estimate needs specifying attributes, e.g., peripheral VA, mesopic VA, monocular VA.

It is evident that each purpose/task imposes certain specific demands on the methods and conditions of VA measurement, and in particular, on the optotype structure. However, there are also common general requirements that seem reasonable or, at least, desirable of any set of optotypes irrespective of their specific application and structure. The preliminary list of such requirements was included into one of our previous papers (Rozhkova et al., 2017). Here, we present somewhat upgraded version of this list with brief argumentation.

GENERAL THEORETICAL REQUIREMENTS TO THE OPTOTYPES

The list of the requirements to the set of optotypes that seem to be obvious and/or have been mentioned in the literature on the VA measurement consists of the following points.

1. *Similarity of average lightness/brightness*. It's important to exclude a possibility to use average lightness/brightness of each optotype for distinguishing optotypes in the set since it has no relation to the VA but could provide high probability of right responses in the case of the optotypes occupying significantly differing parts of the test image field (like the letters B and T (Y) in the ETDRS charts or the pictures of scissors and horses in the test images of Rossano).

2. *Structural uniformity*. In all optotypes of a given set, their components (elementary parts) should be similar. All the stimuli in the set should excite similar functional modules (neuronal detectors, filters) at the periphery of the visual system. Otherwise, different optotypes could activate principally different neuronal pathways, and, therefore, the responses to different optotypes would characterize different visual abilities.

3. *Gnosiological equivalence*. This requirement implies involvement of the same higher visual centers (or obviation the need of them at all) in discrimination of all the symbols in the set. It is evident that one and the same set of the optotypes should not include such different test images as gratings, letters and schematic pictures of objects that could have different degrees of familiarity and significance for different participants.

4. *Equality of information content*. Ideally, probability of identification should be equal for all the optotypes in a given test set. In particular, this implies that the optotypes should contain equal amount of information to exclude *a priori* inequality in the ease of each optotype processing.

5. *Identical values of F_c* in different optotypes designed for the same VA level (e.g. for the same line in the charts). The characteristic spatial frequency, F_c , is the frequency in the Fourier spectrum of the optotype that supposed to determine its visibility or recognizability at threshold. It is evident that F_c should be identical in all optotypes of the set corresponding to one and the same VA level since all of them should have equal visibility. This natural requirement could be considered as an appendix to the requirement 2.

6. *Strong linkage between the optotype legibility and F_c* . Presence of well expressed spectral peaks corresponding to F_c is a necessary condition for dependence of the optotype visibility on F_c . Actually, this requirement has to be addressed to the neuronal optotype images at the input of the processing modules in the brain since the physical (light) images of optotypes projected onto the retina are filtered at the further stages of image processing. However, it is reasonable to think, that the *peaks corresponding to F_c* should not appear in the neu-

ronal image of the optotype if they are absent in the physical image.

7. *Similarity of low-frequency patterns of the two-dimensional Fourier spectra* of all the optotypes in the test set providing insignificant influence of the low-frequency components on distinguishing the optotypes. This requirement means that inter-optotype differences in the low-frequency part of the Fourier spectra should be minimized in order to guarantee that recognition of the optotype presented would be based on the high-frequency part of its Fourier spectrum around F_c .

8. *Equal legibility of optotypes*, i.e. equal probabilities of correct responses to all optotypes of one and the same size in the set. Actually, this requirement is an addition to the requirements 2 (*structural uniformity*) and 7 (*identical values of F_c*). It outlines that probability of the optotype identification should not be biased by the features not relevant to the VA measurement. As was reminded by A. Linksz (1972) in his historical review of J. Green's contribution to ophthalmology, the importance of this criterion was claimed by W.S. Dennett as early as in 1885 at the meeting of AOS (Dennett, 1886): he found that different letters of 2.5 cm high could be recognized at distances varying between 10.3 and 17.7 meters (!) and selected 8 letters of similar legibility. Dennett constructed a new VA chart with the lines containing letters of unequal height, e.g. his 5m-line consisted of the letters equally readable at 5 m, not of letters having certain angular size at 5 m. However, A. Linksz outlined that Green had mentioned unequal legibility of the Snellen type letters in the chart lines even much earlier, in his first communications to AOS.

Ideally, point 8 also means that the proportions of correct and erroneous responses for the optotypes of equal sizes should be equal to each other, and that the probabilities of erroneous identification of a given optotype as certain other optotype from the same set should also be equal for all the pairs.

9. *Steep psychometric function*. For an accurate assessment of the threshold value of the optotype size, the probability of correct responses should rise rather rapidly with increase of the size. Otherwise, due to inevitable noise, the variability of responses would correspond to a wide range of sizes and it would be difficult to determine the threshold size corresponding to the criterion accepted with sufficiently high accuracy.

10. *Easiness of computer generation and varying the size of the optotypes*. This requirement is included in view of a tendency to computerize the VA assessment. Computerization allows to make the procedures of the VA assessment similar to games, to use adaptive algorithms, to create a wide variety of complex optotypes. However, one should take into account certain restrictions of discrete displays hindering reproduction of curvilinear and diagonal contours and limiting reproduction of smooth gradients in the cases of the small-

est optotypes determining the upper level of the measurable VA values.





It is easy to understand that to fit all these requirements is practically impossible. At the same time, in some cases, the optotypes appear to be quite good for certain purposes despite low level of fitting most of these requirements. It seems likely that, in such cases, a discrepancy could be explained by a strong influence of some other factors not taken into account in the list proposed. To illustrate this, let us consider the estimates based on this list of requirements for the following four sets of the widespread optotypes: Landolt C, tumbling E, Lea symbols, and HOTV test for children (Table 1).

These sets of optotypes were chosen for our analysis because they contain equal number of elements – four optotypes in each set. The Table 1 shows that, Landolt C and tumbling E have the largest numbers of pluses. These optotypes fit most theoretical and practical requirements better than many other optotypes. It is evident that the set of Landolt C is ideal as concerned structural and semantic uniformity and not good for presentation on the monitor screens with discrete structure because of distortion of the curvilinear contours. Moreover, it has been shown that Fourier spectrum of Landolt C contains well expressed low frequency components that contributes to recognizing image orientation and, on average, causes “overestimation” of VA if it is anticipated to correspond to the size of the smallest parameters (the gap width and the width of the ring) (Bondarko, Danilova, 1997). Tumbling E shares all advantages and disadvantages of Landolt C but, unlike Landolt C, tumbling E is ideal for presentation on most displays. However, its use for estimation of the VA as the resolving power is also problematic because the presence of low frequency components essentially influences legibility of the optotypes at threshold and, in addition, that influence is not similar in different observers (Rozhkova et al., 2012; 2017).

Lea symbols are not uniform and not equivalent semantically and not well suited for computer presentation. However, their specific configurations and proportions provide fitness to the most important requirements – equal legibility and small contribution of low-frequency spectral components to the optotype recognition. Identity of F_c values in all four symbols is also evident since, in this set, F_c is determined by line width that is one and the same in different symbols of each VA level. These pluses appeared to be more essential than minuses in uniformity and semantics. The explanation could be that the very schematic drawings of Lea symbols evoke but faint associations with real objects and might be treated simply as geometric configurations.

HOTV is a test commonly used for preschool children. It is assumed that these four letters (that could be considered not as letters but as different geometric

Table 1. Characteristics of the four widespread sets of optotypes in view of the proposed list of requirements. The signs “+” and “–” mean YES and NO in correspondence to fitting or not fitting of the requirements indicated. The line 9 is not filled since it needed experimental data but we could not find sufficient information for all the test sets compared

№	Requirement	Optotypes			
		Landolt C 	Tumbling E 	Lea symbols 	HOTV 
1	Similarity of average lightness	+	+	–	–
2	Structural uniformity	+	+	–	–
3	Gnosiological equivalence	+	+	–	+
4	Equality of information content	+	+	–	+
5	Equality of characteristic frequencies	+	+	+	+
6	Direct relation of legibility to characteristic frequency	–	–	+	–
7	Similarity of low-frequency contents	–	–	+	–
8	Equal legibility	+	+	+	+
9	Steep psychometric function				
10	Easiness of computer generation	–	+	–	–
Σ		6	7	4	4

configurations) are of similar legibility and it seems likely. However, they are not uniform in structure (“V” is composed of oblique lines; “H” and “T” contain different numbers of vertical lines; “O” is curvilinear, unlike all the three other elements) and low-frequency spatial spectral components seem to play a significant role in their recognition (their blurred images can be recognized at high degrees of blur when high-frequency components are almost absent). Nevertheless, the HOTV-set is very popular and, evidently, useful test.

The HOTV test was proposed for very young or mentally retarded children in 1930 and was modified later by the same authors (Pugmire, Sheridan, 1930; 1957). At present it is considered as appropriate for children of developmental ages between three and seven years. Its popularity could be explained by the fact that, choosing these optotypes, the authors had taken into account the age norms for perception and copying geometric figures (see Lippmann, 1969; 1971). One of the benefits of these optotypes is their symmetry in relation to the vertical axis, so no confusion between right and left side influences the assessment. It is obvious that a good match of the test material to the age norms is one of the important conditions providing success in practical work.

Practical requirements to the optotypes

Most researchers having experience in employing various tests for the VA assessment know that the applicability and popularity of a given test depends not only on its theoretic perfection but also on many heterogeneous factors essential for its attractiveness to pa-

tients and providing efficiency of work for scientists and clinicians. Below we present a preliminary list of practical requirements. It begins from the requirement considered just above and contains some brief comments.

– *Correspondence of the test content to the observer’s age.* This means that the test content has to be in concordance with the relevant ontogenetic data concerning visual system. It is well known that even newborns have certain inborn preferences in looking and that, for infants and younger children even simple geometric figures differ in salience, legibility and attractiveness. For instance, newborn prefer to look at a schematic face when it presented in pair with a random configuration of the same pictorial elements (Fantz et al., 1962); preschool children could copy the lines of different orientation and simple geometrical figures sufficiently well at various ages (Sheridan, 1960), etc. Inborn preference to look at a structured visual field when it is paired with a homogeneous one has been used by Davida Teller to elaborate her remarkable method of preferential looking (Teller, 1979) which appeared to be proper for practical use in clinical and scientific investigations of infant vision. In adults, the paradigm of preferential looking is not employed because of natural changes with age in visual and other abilities of the testees permitting to employ a large variety of more effective paradigms for the VA assessment. As concerns a routine VA assessment, young adults could be tested with equal success using letters and simple optotypes whereas old people with low vision (e.g. cataract patients) show essentially better VA with simpler optotypes and lesser number of optotypes for choice in the test set (Kazakova et al., 2020).

– *Simplicity of the visual task.* During testing, most people feel certain discomfort because they undertake some efforts to adapt to the unfamiliar circumstances and experience some anxiety about the results of examination. Therefore, at any age, the simpler the visual task given to the testees, the better for them and for the examiners regarding psychological comfort, easiness of communication and duration of the VA assessment procedure.

– *Familiarity and attractiveness of the optotypes.* Familiar optotypes or the ones with interesting features stimulate friendly interaction between the testee and the examiner, and motivate testees, especially children. From this point of view, for an accurate VA assessment in younger children, it seems beneficial to use embedded optotypes since the dull uniformity of the test images can be compensated by a vast variety of interesting surroundings.

– *Easiness of identification and consistency of naming (description) of the test stimuli.* In certain cases, the testee has difficulties with proper naming of the presented test image which is well seen but permits ambiguous descriptions (e.g. abstract configuration or unusual complex shape of a well known object). That is why the optometrists like letters so much: there is no need to explain how to respond to the presented optotypes. In contrast, because of difficulties in verbalization, even in the cases of very simple abstract figures, testing is often impossible without employment of the samples placed near the testee to select the presented test figure from the whole set and to indicate it manually. Naturally, moving the gaze from the test chart to the samples and back takes time and makes the examination more tiresome and long.

– *Laconic, clear, and unambiguous instruction.* It is advantageous if the instruction can be formulated in two-three sentences, easily understandable for the examined individuals, and unambiguous, i.e. does not permit more than one interpretation. The characteristic example of such case is the 3-bar optotypes. This test is graphically simple and theoretically good. Moreover, its structure copies traditional physical test for assessment of the optical system quality (USAF-1951). However, unexpectedly, it appeared that a significant percentage of individuals perceive this test as ambiguous and demonstrate incorrect responses. For this reason the test can only be used with precautions and additional explanations. The psycho-physiological basis of this situation is considered in more detail in the next section.

– *Taking into account age-dependent psychological peculiarities of the response behavior.* Younger children and old adults with impaired vision sometimes refuse to respond to the test image presentation seemingly without any reason. However, some reasons of such a behavior can usually be discovered in the course of a friendly interviewing the testees after or during examination. In some cases the reason reminds of the situ-

ation with the Buridan's donkey (dyed of hanger being unable to choose between two equally attractive sources of food). Evidently, it concerns extremely indecisive persons unable to make a decision at near threshold conditions (when certain test images appeared to look as almost identical). In other cases the testee are incapable to name very simplified silhouette images of the test objects or suspect that his/her response will be laughed at. Most refusals are of psychological origin. However, there are also more rare reasons of silence. For instance, some children keep silence when they do not agree to pronounce the name of a certain schematic image since this image does not contain the details which they consider to be absolutely necessary for a real object.

The above consideration of various theoretical and practical requirements to the optotypes shows that the researchers are still at the first stages of a long way to reliable and adequate appreciation of each optotype functional quality and usability.

SPECIFIC ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF CERTAIN OPTOTYPES: EXAMPLES OF A MORE DETAILED ANALYSIS

It is often difficult to comprehend some important properties of the optotypes from the first glance, and, in particular, to notice principal difference between apparently very similar optotypes. In fact, only after a thorough theoretical analysis and a special series of comparative experiments one could appreciate adequately all the aspects of using a given optotype. In literature, descriptions of such investigations are not numerous for two reasons: the clinicians and practical users rely on traditions and authorities unconditionally (1); the researchers-theoreticians usually examine not enough number of observers and describe their results in a form far from practical needs.

Here, we present the examples of investigations devoted to a more detailed analysis and/or experimental assessment of the following optotypes: sinusoidal gratings, 3-bar targets, tumbling E and letters. Our purpose is to demonstrate some principal benefits and difficulties encountered in experimental and clinical work with such optotypes and to emphasize the necessity of being more precautionous in interpretation of the results obtained with a given optotype and in performing comparative studies with different optotypes.

Sinusoidal and square-wave gratings

Gratings were chosen for thorough analysis in this review as the optotypes appropriate for assessment of a very important kind of the VA – the resolution VA, or the resolving power of the visual system. In physics, sinusoidal and square-wave gratings traditionally serve as the tests for measuring visual resolution of various optical systems. The specialists in vision science wide-

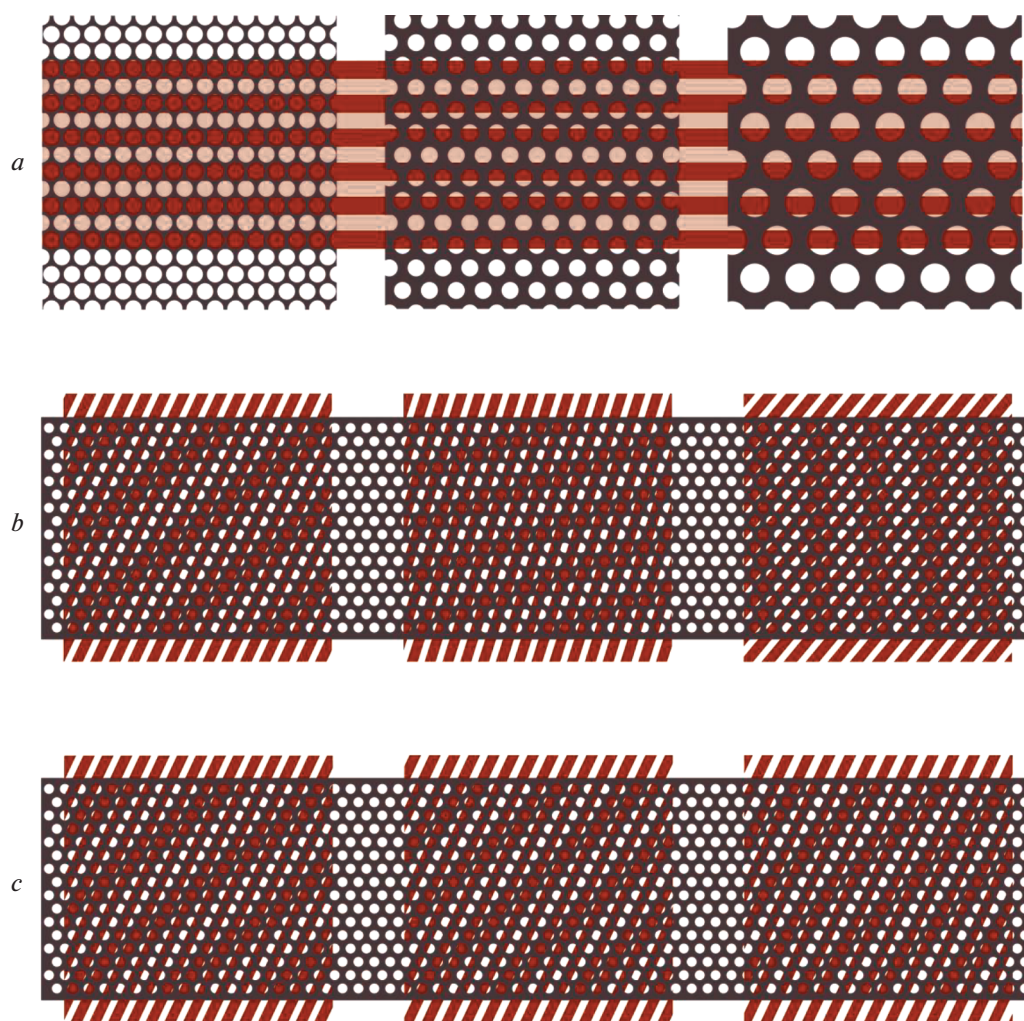


Fig. 3. The schemes illustrating dependence of grating images on the photoreceptor density (*a*), grating orientation (*b*: 60-70-90°), and grating frequency (*c*: the ratios of frequencies are 1.00:1.04:1.1).

ly employ sinusoidal gratings since the second half of the last century, thanks to the pioneering works of Campbell and his coauthors introducing Fourier analysis in vision studies (Campbell, Green, 1965; Campbell, Robson, 1968). In parallel, the advantages of sinusoidal gratings for optometry were also appreciated and put into practice. Since 70-ies of the last century, spatial gratings were successfully and systematically employed for quantitative VA assessment in the newborns and infants by means of VEP (Marg, Freeman, 1976; Norcia, Tyler, 1985; Atkinson, 2000; etc.). Actually, however, the optometrists often use essentially simpler square-wave gratings (with sharp black-white bars) instead of corresponding sinusoidal ones. For instance, such gratings are employed in the famous Teller cards – the set of the tests for the forced-choice preferential looking procedure that became widely applied soon after its invention (Teller, 1979; 1983; 1997; Teller et al., 1982; Mayer, Dobson, 1980, 1982; Mayer et al., 1995; etc.).

It is easy to show that substitution of sinusoidal gratings by corresponding square-wave ones has no injurious effect on the assessment of the highest spatial frequency perceived by the individual examined. The matter is that, in the spectrum of the stimulus with sharp black-white bars, the most prominent peak corresponds to the frequency of comparable sinusoidal grating F_s , whereas other noticeable peaks, appearing due to rectification of the sinewave, correspond to the higher frequencies (multiples of F_s) that can not be perceived when the frequency of the test grating is close to the critical value (resolution threshold). Thus, sinusoidal gratings with gradual modulation of lightness/brightness could be substituted by two-grade black-white gratings without essential loss in the accuracy of measurements. For this reason, further in this section, we do not distinguish sinusoidal and square-wave gratings.

Theoretically, in the case of many physical systems, the accuracy of measuring resolution increases with

increasing the size of gratings. However, in the case of the human visual system, it is not rational to employ too large stimuli.

The first reason is connected with the inhomogeneous structure of the human photoreceptor layer. In the foveal region, cone density fall very rapidly with increasing distance from the center of the fovea (Curcio et al, 1990). Such feature makes it senseless to use large stimuli since different parts of these stimuli will be projected onto the retinal regions with essentially different photoreceptor density – the main factor determining visual resolution. Figure 3, *a* illustrates this situation schematically showing a stripe of a test grating projected onto the three foveal regions at different eccentricities.

The second reason for avoiding large periodic patches is familiar to everybody from everyday experience. When a patch of relatively dense uniform periodic structure (e.g., a striped cloth or multiple parallel lines on the sheet of paper) is large enough, it evokes very unpleasant dynamic moiré images and afterimages precluding long observation. (It is interesting that even regular parallel lines of windows in large buildings often evoke unpleasant sensations (Filin, 2006) despite not producing moiré.) The moiré images emerge due to overlapping of the observed periodic pattern onto different periodic patterns of photoreceptors in the retina that perform sampling of the input images differently at different loci since the photoreceptor arrays (mosaics) are different at different eccentricities. Figure 3, *b* and *c* shows that transformations of the resulting grating images could be radical (*b*) and could be very “sensitive” to the spatial frequency of gratings (*c*). These pictures help to understand why in the case of gratings, detection acuity can be consistently better than recognition acuity: a single test grating can be reliably distinguished from a comparison uniform field irrespective of its perceptual distortions whereas recognition of the test gratings requires more perfect reproduction of their structure.

It is obvious that, for reliable VA measurements, the size of the test gratings has to be reasonably limited. Luckily, this restriction seems to be acceptable. In the experiments with presentation of gratings in windows of varying size, Roger Anderson and his colleagues showed that probability of grating detection becomes close to the final highest level when the number of grating periods in the test image exceeds six (Anderson et al., 1996).

There are also investigations showing a positive effect of introducing certain irregularity into regular photoreceptor arrays on orientation discrimination in the case of gratings (e.g. Snyder, Miller, 1977; Miller, Bernard, 1983; Evans et al., 2010). Probably, it might be one of the reasons why strictly regular retinal structures are common among lower vertebrates but absent in primates.

Thus, one could conclude that for correct use of gratings for the VA assessment and for comparison of the data obtained with the grating stimuli in different studies it is necessary to take into account all the peculiarities of the techniques and experimental paradigms that could influence the results of measurements.

Standard and modified 3-bar targets

Theoretically, sinusoidal gratings are the simplest stimuli requiring only one parameter for characterization of their shape – spatial frequency. Nevertheless, as is clear from the above consideration, in practice, an accurate interpretation of the results obtained with such simple stimuli for the VA assessment needs taking into account some other conditions of the measuring procedures. It seems natural to suppose that the stimuli of more complex shape could create more problems. Indeed, generally speaking, it is true. However, it is often not easy to predict these problems and to find the ways to solve them. In this respect, it is interesting to consider relatively simple 3-bar optotypes that are employed for visual acuity assessment, in particular, in the US army. There optotypes constitute the basis of the USAF-1951 (United States Air Force 3-bar test chart) and usually named 3-bar test targets.

The standard 3-bar test targets (S3B) consist of 3 identical black bars on a white background separated by the intervals equal to the bar width (w). The test set includes the targets with horizontal (H) and vertical (V) bar orientation. The characteristic spatial frequency F_c of each optotype corresponds to a period of grating consisting of one black bar and one white interval, i.e. F_c is equal to $60' / 2w = 30' / w$.

It is worth noting that, before dwelling on letters as the optotypes for his famous test chart, even Snellen considered 3-bar configuration as promising for vision assessment (along with other simple images: see Colenbrander, 2008).

However, the initial version of the 3-bar targets that was taken as a basis for the USAF-1951 and became considered as a standard sample, appeared to be not quite good for practice. Leaving aside the earlier attempts to understand this situation, it is reasonable to illustrate the shortages of the standard 3-bar targets using psychometric functions and Fourier analysis. The studies of the 3-bar targets carried out at the Institute for Information Transmission Problems, RAS, during more than 10 years provided clear evidence of the principal inter-individual variability of psychometric functions, helped to understanding the reasons of this variability, and to find the ways to “improve” these optotypes making them more appropriate for practice. This work included both experimental investigations of the optotype perception in different groups of observers and theoretical analysis based on Fourier transformation (Lebedev et al., 2012; Rozhkova et al., 2012; 2017) and were crowned by computer simulation

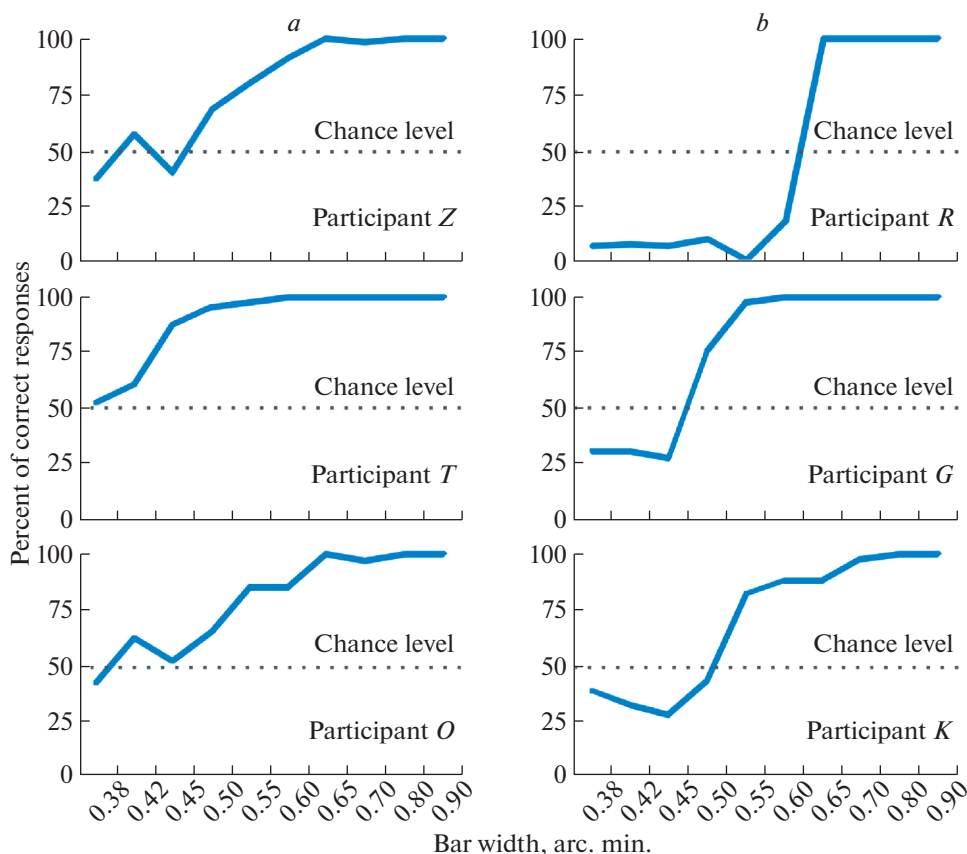


Fig. 4. Psychometric functions obtained using standard 3-bar targets.

of the optotype processing in the visual system (Lebedev, 2015).

At the first stage of this work, it was unexpectedly found that, in many participants, the psychometric functions obtained with such optotypes demonstrate characteristic anomalies (Figure 4).

The left column of this figure shows “normal” cases, i.e. psychometric functions of the participants whose data corresponded to the anticipated psychometric functions gradually rising from 50% – theoretical minimum value equal to the level of guessing at random for the performed experiments with the two stimuli in the test set and 2AFC paradigm. However, such data were obtained in less than a half of the participants examined. The right column shows that, in some other participants, at threshold stimulus sizes, probability of correct responses could fall to the level of 10% and lower, i.e. probability of wrong responses reached theoretically impossible levels of 90–100% instead of 50%.

It is interesting that anomalous psychometric curves were described long ago in papers presenting the results of VA measurements in human infants by means of preferential looking methods based on Teller gratings (Held et al., 1979; Teller et al., 1982). One of

the possible explanations presented in the second reference is that such psychometric functions “could be caused in one way or another by brightness difference between the grating targets and the homogeneous fields” (Teller et al., 1982, p. 1021). One source of potential brightness artifacts is that the gratings and the homogeneous field might not be exactly matched in luminance and infants may “tend to stare at the brighter of the two fields when both appear homogeneous”.

It seems likely that in participants with anomalous psychometric functions for 3-bar targets, decision about stimulus orientation could be based on some strong cue provoking the decision opposite to the correct one. Indeed, such cue could be revealed: using S3B, one could notice that, at near-threshold stimulus sizes, the orientation of the whole perceived stimulus image (i.e. long axis of the blurred spot) was orthogonal to the orientation of the just discernible separate bars. Some participants could unconsciously consider orientation of the whole image as an indication of the bar orientation when fine structure of the test stimulus became indiscernible. To counteract this misleading cue, the participants may be instructed of directing attention to the orientation of the bars only but not of the whole image. However, we haven’t find publica-

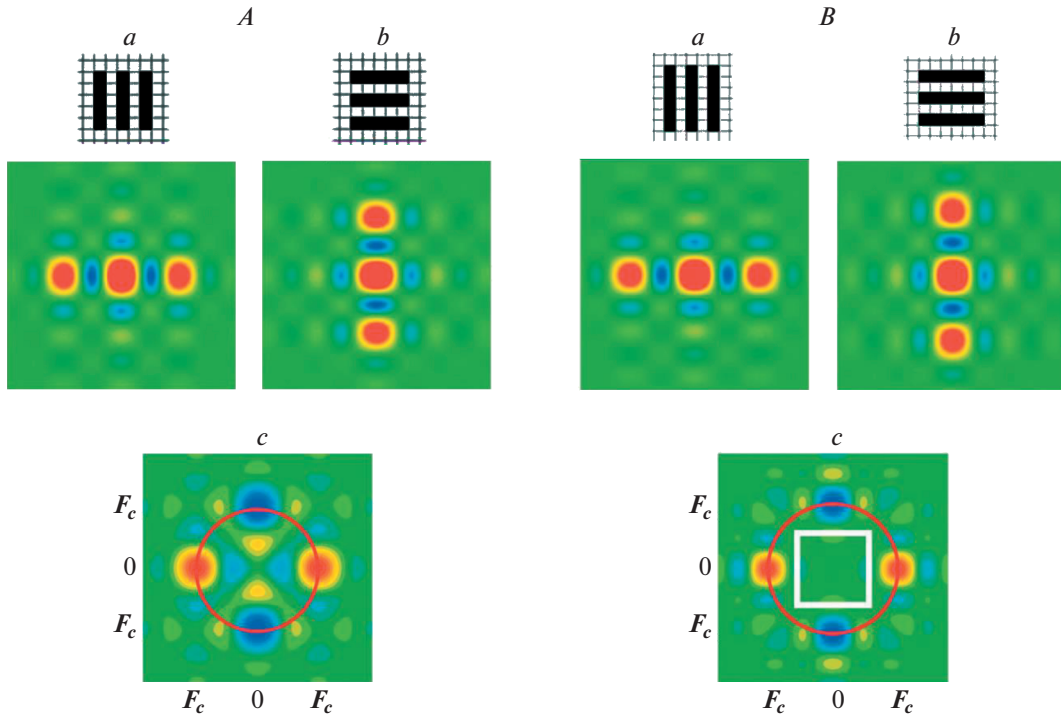


Fig. 5. *A* – The amplitude Fourier spectra of the standard 3-bar targets calculated for vertical (*a*) and horizontal (*b*) bar orientations and their difference amplitude Fourier spectrum (*c*). *B* – The amplitude Fourier spectra of the modified 3-bar targets calculated for vertical (*a*) and horizontal (*b*) bar orientations, and their difference amplitude Fourier spectrum (*c*).

The color code used: red – positive values of the spectral component amplitudes, green – zero value, blue – negative values. The marks along the horizontal and vertical directions correspond to the characteristic frequency of the optotypes, F_c . The parts of the spectra extending into the range of the spatial frequencies essentially higher than F_c are rejected since we consider in near-threshold situation, F_c is close to the highest perceivable frequency.

tions on the efficiency of such instruction or on any attempts to improve test images.

Since it seemed problematic to guarantee that all the examiners would give right instruction in all cases, and to control that all the observers would follow the instruction accurately, the researchers decided to correct the sizes of horizontal and vertical S3B trying to make their blurred threshold images equal in length and width, i.e. having no differences in sizes along horizontal and vertical directions. Indeed, varying the bar length, one could notice that the blurred images of the 3-bar optotypes with horizontal and vertical bar orientations could really be made practically indistinguishable if the bar length would be increased by 15–20%.

This empirical finding was confirmed theoretically by means of Fourier analysis. It was suggested that the anomalies considered above could be explained by a specific influence on stimulus recognition of certain low-frequency components in the Fourier spectra of the standard 3-bar images (Rozhkova et al., 2012).

Investigating two-dimensional Fourier spectra of H- and V-S3B images (Figure 5*A*, *a*, *b*), the authors have found that their belongingness to H or V orientations could be ascertained not only on the basis of the

high-frequency components (the large blobs around the characteristic frequency F_c) but also on the basis of low-frequency components (in particular, comparing orientations of the largest central oval blobs: their long axis are orthogonal to each other). The difference between the central blobs is more finely revealed in the amplitude difference Fourier spectrum of the two images (Figure 5*A*, *c*). This spectrum contains both pairs of F_c -blobs corresponding to the high-frequency spectral components of H-S3B and V-S3B (naturally, the second pair became negative due to subtraction) and also two pairs of the smaller and weaker blobs oriented orthogonally to the F_c -pairs as concerned their signs (colors).

Moreover, the data of the Fourier analysis appeared to be correlated finely with the results of the experiments aimed at equalizing the blurred images of the near-threshold 3-bar targets of vertical and horizontal orientations. Creating properly modified 3-bar targets, i.e. elongating the bars by 15–20%, one could obtain the test set of modified images, H-M3B and V-M3B, that could be recognized but only on the basis of the highest spectral components around F_c . It is shown in the Figure 5*B*, parts *a* and *b*, containing the spectra of modified 3-bar targets, analogous to those

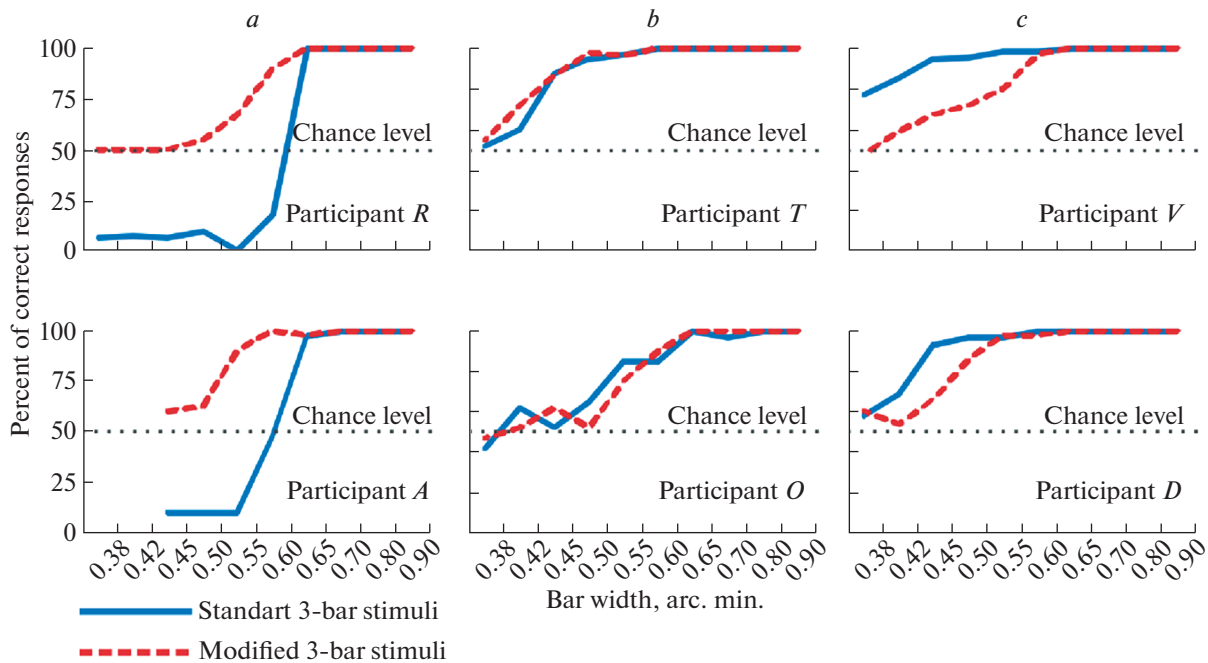


Fig. 6. Psychometric functions obtained with the standard and modified 3-bar targets in different participants: misusing low frequency information (*a*), ignoring low frequency information (*b*), and using low frequency information properly (*c*).

of Figure 5A for the standard test set, H-S3B and V-S3B. It is clearly seen that moderate elongation of the bars made the spectra of H-M3B and V-M3B very similar in the low-frequency region and, accordingly, led to elimination of misleading low-frequency blobs in their difference spectrum (Figure 5B, part *c*). Taking into account this anticipated change, it was predicted that the modified 3-bar targets would not produce anomalous psychometric functions in the participants previously showing the probability of wrong responses of 90–100% instead of 50%. Indeed, it was confirmed: the pairs of psychometric functions obtained in these participants are shown in Figure 6, *a*. Also it was expected that in the observers with “normal” psychometric function for the standard 3-bar targets, stimulus modification would not change the function shape and it was really the case (Figure 6, *b*).

It was natural to expect that, during examination with the standard 3-bar targets, more attentive and bright observers could notice that the two indicated orientations were orthogonal to each other and could use this fact properly in favor of increasing the probability of correct responses. In contrast to those naïve observers which systematically mess orientations of the separate bars and the whole targets unconsciously, some quick-witted participants could consciously rely on the noticed relationship of the two orientations in their responses when separate bars became indiscernible in the stimuli of near-threshold sizes. In other words, quick-witted (and also experienced or observant) participants could be able to use the described imperfectness of the standard 3-bar stimuli turning it to a prompt and guessing the bar orientation on the ba-

sis of the whole blurred image orientation (having in mind that these orientations are orthogonal to each other).

This expectation was confirmed both by interviewing such quick-witted participants and by comparing the results of their examination with the standard 3-bar stimuli and the stimuli specially modified to exclude such indirect cue of the bar orientation (Figure 6, *c*). It is seen, that using modified 3-bar targets instead of the standard ones led to a significant increase in the threshold values of the stimuli.

Obviously, in most cases, it takes some time to gain enough experience and notice the discussed misleading discrepancy in orientations of the bars and the whole blurred images and to learn making proper correction systematically. The number of the trials necessary for this insight varied from several tens to several hundred depending on individual abilities of participants and conditions of the stimulus presentation. For instance, it was noticed that the time of learning was much longer when the single lines of equal-sized stimuli were presented in sequence instead of traditional presentation of the whole chart with the stimuli of various sizes. It may be supposed that, in the second case, a possibility to compare perception of adjacent lines in certain intermediate range of sizes, where the bars visibility changes from quite good to problematic, helped to notice and realize the orientation discrepancy between the bars and the whole image.

It is noteworthy, that approximately 1/3 of participants showed neither positive nor negative effects of using low-frequency information in the case of H-S3B

and V-S3B even if they were informed about a possibility to use it (Fig. 6, *b*). In the case of H-M3B and V-M3B, the psychometric functions of all participants had anticipated uniform shape corresponding to classical monotonic psychometric curve ascending from the chance level of 50% to the level of 100%-correct responses.

The curves presented in Figure 6 illustrate the following three important conclusions that could be made from the comparative studies of the standard and modified 3-bar optotypes:

- Even small changes in the optotype shape could radically affect its perception at threshold;
- If the optotype shape contains indirect cues that could essentially affect the responses, inter-individual variability of the psychometric functions could be very significant indicating existence of principal differences in visual information processing;
- Proper modification of the optotype could make individual psychometric functions more similar due to elimination of the factors causing their variability.

One could argue that, in the cases of “inappropriate” optotypes, high inter-individual variability were determined by the higher levels of visual information processing and could be eliminated by means of proper instruction. This argumentation seems to be reasonable but the situation is not so simple. Firstly, not every participant is ready to follow the more complicated instruction, and some participants will certainly use the warnings for their own profit. But there is a second, more principal complication: in some range near the threshold, most participants could unconsciously use indirect ambiguous cues and remain unaware of it.

It is reasonable to suggest that the optotypes with more complex structure conceal more ambiguous cues and, therefore, the complexity should be minimized.

Tumbling E optotypes

As was already noticed above, the standardized letters are still widely used in the VA measurements despite repeatable claims to turn attention to their serious flaws as the optotypes. Obviously, a general convenience of letters for practical applications outweighs their flaws. Nevertheless, both for theoretical analysis and for practice, it is important to understand significance of certain unfavorable features of the letters.

It seems rational to begin from the tumbling E optotypes since they differ by only one additional bar from the 3-bar optotypes analyzed above. Strictly speaking, the set of the E-shaped stimuli in four orientations can not be considered as a test with letter optotypes (it was specially created for the illiterate people): in fact, only one of these stimuli corresponds to certain “normal” letter. However, from theoretical point of view, this is not essential since geometrical features and perceptual characteristics of the tumbling-E stimuli are comparable to the typical stimuli catego-

rized as letters and to the standardized letter stimuli used in optometry.

The difference spectra calculated for the tumbling-E stimuli and the psychometric functions obtained with these stimuli are presented in Figures 7 and 8 along with corresponding data for the standard 3-bar optotypes.

In Figure 7 (unlike Figure 6), shows the power difference spectra, not the amplitude ones. It was done to provide a possibility of direct comparison between the data of our lab studies and similar earlier data published by Anderson and Thibos (1999a). Their paper contains additional important data related to perception of filtered optotypes with reduced spectra created by cutting the lower or higher frequencies. The psychometric functions obtained with such optotypes help to identify those frequency components which might be sufficient for discrimination of the stimuli in the test set. However, these authors performed their study with only two observers and, therefore, had little possibility to reveal that the observer’s psychometric functions could differ principally. This was found in the experiments performed at our lab (Figure 8) supporting our anticipation that different subjects could differently use low-frequency information and demonstrating different types of psychometric functions for tumbling E even in the cases of similar psychometric functions for the standard 3-bar stimuli (Figure 8a).

Sloan letters

At present, the preferred letter stimuli in clinical practice is Sloan letters (Sloan, 1959) comprising the basis of the ETDRS charts (Ferris et al., 1982; 1993). However, a majority of clinicians do not realize how far the examination with such letters from the ideal procedure of the VA assessment. To illustrate this, it is enough to consider a sample of psychometric functions published in the paper (Plainis et al., 2007). The purpose of the authors was to evaluate a modified ETDRS chart with a set of Sloan letters different from the standard commercial ETDRS sets. Planning to create a chart for European-wide use, the authors decided to include there but only the Sloan letters readable by all European citizens. Comparison of the two charts was performed by measuring VA in a large number of schoolchildren, on one hand, and by assessing the psychometric functions of 5 subjects, obtained for 18 Sloan letters, on the other hand.

As an example, we selected three curves from all the psychometric functions presented in the paper and combined them on one graph (Figure 9).

These curves were obtained for the letters Z, S and K (using seven letter sizes with a progression of 0.05 log units) in one and the same subject. It is clearly seen that the curves are essentially different revealing different legibility of these letters. The dashed lines help to see that, at the level of -0.05 log units, proba-

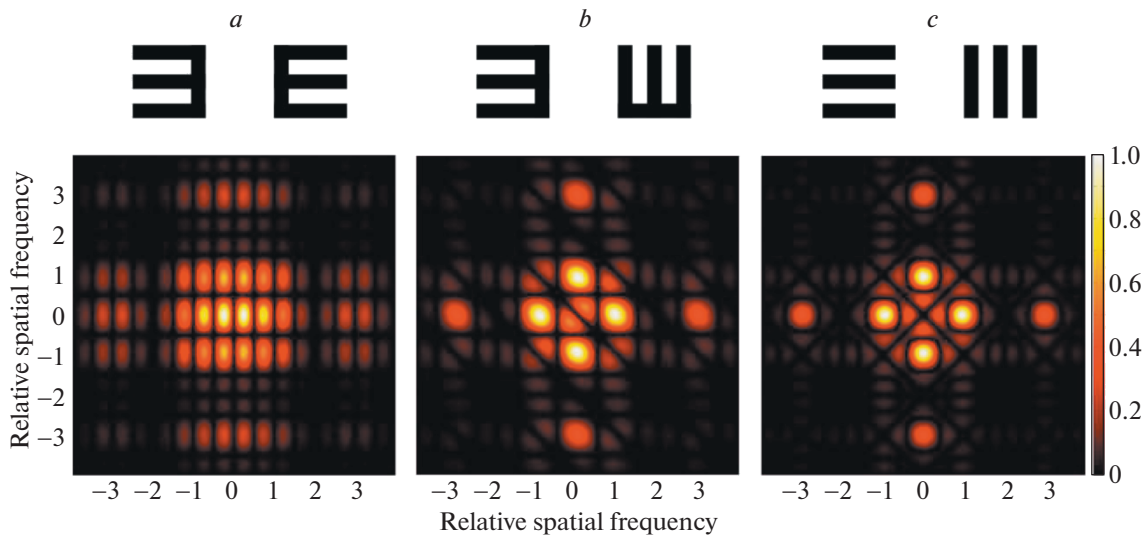


Fig. 7. The difference power Fourier spectra of the tumbling E optotypes calculated for the pairs with parallel and orthogonal main bar orientations (*a* and *b*) and of the standard 3-bar targets with vertical and horizontal bar orientations (*c*).

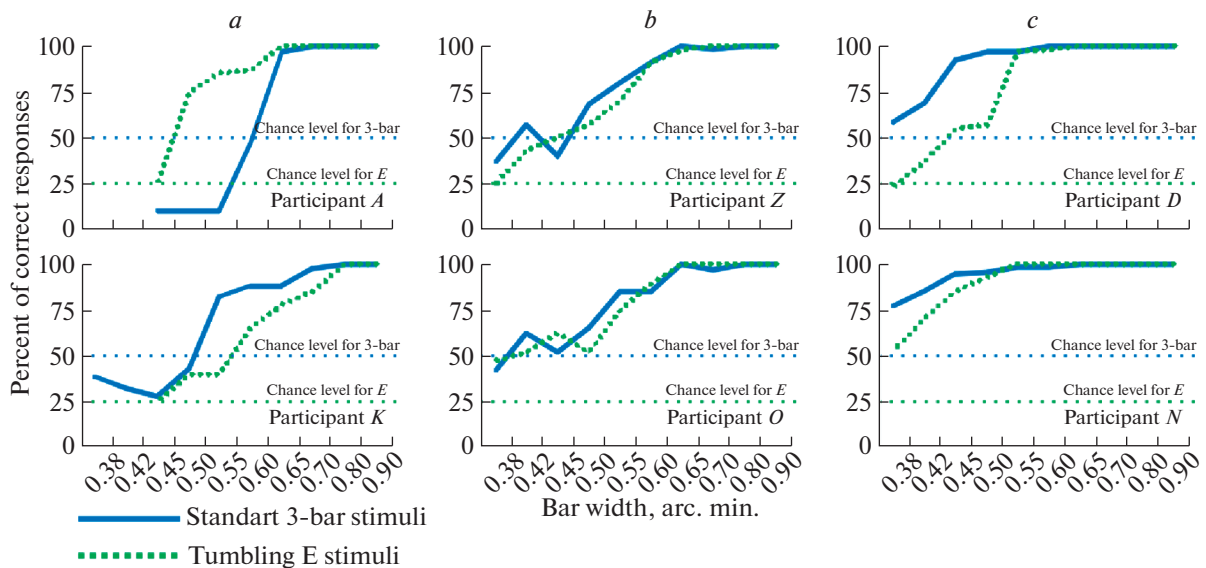


Fig. 8. Psychometric functions obtained with the tumbling E stimuli and the standard 3-bar targets in different participants which (according to the previous data) misused low frequency information (*a*), ignored low frequency information (*b*), and used low frequency information properly (*c*).

bility of correct response is equal to 100% for the letter Z, about 65% – for S, and only 40% – for K. Since the levels shown along the horizontal axis (0.0; -0.1; -0.2; and so on) correspond to the lines of the ETDRS charts, it is evident that each line could contain the letters of very different legibility thus reducing the accuracy of the VA measurements. It seems irresponsible to declare high accuracy of the VA measurements with the charts including such optotypes.

A significant decrease of accuracy due to different legibility of letters is a general flaw of most existing letter charts. The requirement of equal legibility of all the test stimuli is the obligatory requirement of the precise tests for the VA assessment. Regarding letters, the con-

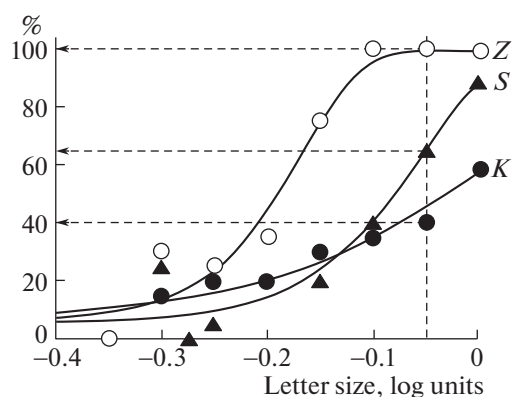


Fig. 9. Psychometric functions of the letters (*K*, *S*, *Z*) from one and the same line of the ETDRS chart.

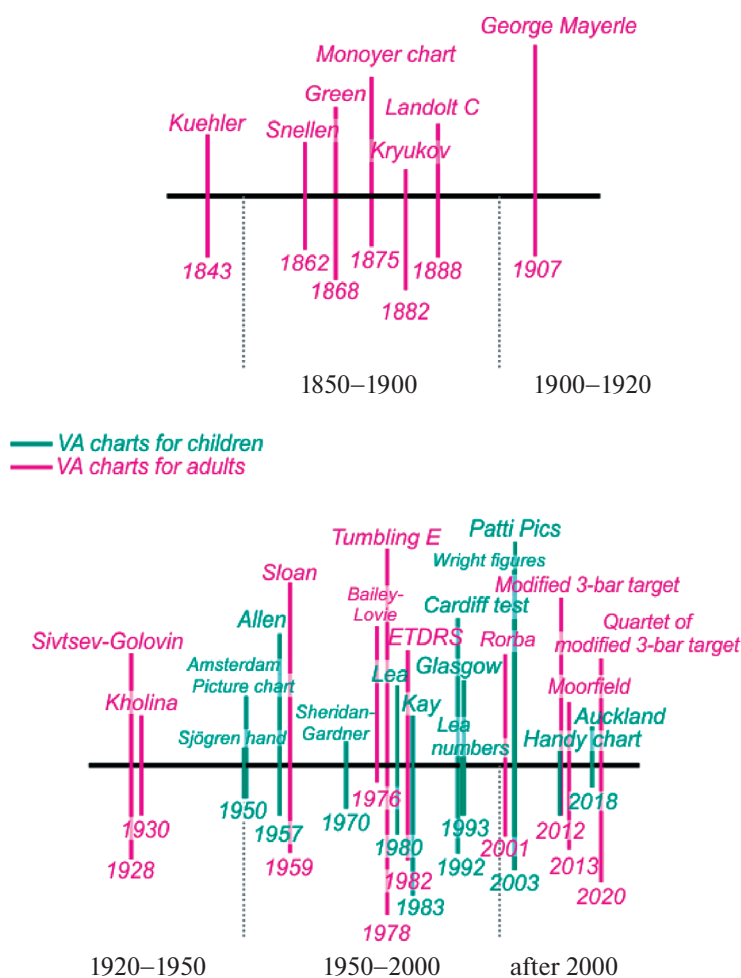


Fig. 10. A chronological scheme of various VA chart origin.

clusion from all the data available in the literature is that one could find no more than 5–6 Sloan letters of similar legibility (see Figure 5 from Plainis et al., 2007 as an example) that could be employed to construct a chart of standard structure for precise VA measurements.

It was already mentioned above that there were attempts to complete the set of letters for each line not on the basis of the letter sizes but on the basis of legibility thus putting the letters of different heights in one and the same line. Though such an approach seems to be problematic in application to the charts, probably, it can be easier introduced into practice of computer measurements with sequential presentation of single test stimuli.

DESIGNS OF THE CHARTS FOR VISUAL ACUITY ASSESSMENT

Though since the time of publishing the first chart for the VA assessment by Kuchler in 1843, a lot of various devices were proposed as the testing tools, especially during the last fifty years, the charts continue to

hold a primary position among all the tools up to date. They are widely spread over the world and have a lot of versions. Being filled with different optotypes, they appeared to be appropriate for many purposes, conditions, and populations. Their total amount is not assessed, probably it numbers several hundreds.

History of the visual chart development

The chronological sequence of various visual chart emerged over the time is presented in Figure 10. Because of technical limitations, not all the worthy charts are included, however, this Figure 10 helps to view the main stages in of the visual chart development.

Ripening and integration of general main ideas about reasonable visual chart structure took approximately 30 years. The three basic principal steps are shown in Figure 11, *a*. The process was initiated by Kuchler who invented regular placing of the test material (the set of printed words) in parallel lines according the letter size (Kuchler, 1843: the chart 1 in Figure 11, *a*). The second inventor was Snellen who introduced the notion of optotypes and appreciated

layout, or format, elaborated by Snellen, determined the basic variables for upgrading this tool later: proportions of the test letters, progression of the letter sizes (reference levels), number of rows, numbers of letters in each row, horizontal letter spacing, vertical spaces between the rows.

The next principal idea of the reasonable chart design was proposed by Green (1868). This researcher simplified the letter shape further (eliminated serifs) and invented a chart design now known as proportional or logarithmic (the chart 3 in the Figure 11, a). In the Green chart, the sizes of the standardized letters were decreasing from the top to the bottom in geometrical progression; the spacing of letters in each row and vertical distances between different rows were proportional to the letter size; and the number of letters in all the rows (barring the first one with the largest letters) was one and the same. It is remarkable that such a design is very similar to the design of modern standard ETDRS chart: the only difference is the number of letters per row (in the ETDRS charts, it is equal to 5). However, the invention of Green was not introduced into practice when he was alive and even much later. Perhaps, one of the reasons was too large number of letters per line in the proposed charts that could make examination too long. The ideas of Green firstly emerged in practice in 1976 when Bailey and Lovie proposed similar chart design with only five letters in each row (Bailey, Lovie, 1976; Bailey, Lovie-Kitchin, 2013).

In 1888, Landolt published a new chart with the optotypes principally different in shape from the letters – the rings inscribed into 5×5 matrix with a gap of 1 element (later named “Landolt Cs”). However, the design of the Landolt C charts based on these optotypes was similar to the Snellen charts but not to the Green chart. The influence of both Landolt’s and Green’s ideas could be revealed in the work of Kholina (1930) who created a set of charts with nearly proportional design and the steps in size of 0.05 log units – twice smaller than 0.1 log units proposed by Green and (after more than 100 years) used in the Bailey-Lovie chart.

Later evolution of the charts for the VA assessment could be characterized mainly by including new content and/or varying its layout to make the chart more appropriate for particular purposes or population contingents. In the second half of the XX century, a lot of charts emerged for examination of children; naturally, most of them contained various pictures as the optotypes.

Figure 11, b shows the examples of the charts with various arrangement of content proposed by the researchers for various purposes: vision screening in Russia (2), investigation of crowding effect (3), assessment of peripheral vision (10), comparison of the examination with the two different optotypes (9); etc.

In optometry, a serious effort was made to provide total standardization of the VA charts while accuracy and efficiency of the VA measurements attracted lesser attention. There were many publications repeating the guidelines for the chart design that are actually were not proved to be necessary in all conditions by means of proper experimental investigations. This remark concerns such recommendations as:

- to use logarithmic design exclusively;
- the horizontal spacing between the optotypes should be equal to the width of the optotypes on a line;
- the vertical spacing between the lines should be the height of the optotypes in the next line down;
- the size of the optotypes should progress geometrically up or down the chart by approximately 0.1 log units; etc.

Though it was reasonable to follow universal strict recommendations during the earlier studies, at present, it seems more important to stimulate a search for other possibilities: the attained better knowledge of visual processing, vision mechanisms, and their impairment shows that, in view of optimizing vision examination and visual diagnostics, the recommendation should depend on many factors and conditions.

Let us consider one of the chart parameters – the number (N) of the optotypes per row. Figure 12 clearly demonstrates that the reasonable values of N strongly depend on the set of the optotypes. The following three cases are analyzed: 2; 4 and 10 optotypes of equal legibility in the sets (corresponding to the chance levels 0.5; 0.25; and 0.1 for correct recognizing single optotypes). The evaluation of the procedures is based on calculation of the probability (p) to give correct responses at random to all N optotypes in the row. As is shown in the Figure 12, a, such a probability is rapidly decreases with increasing N, and probability of erroneous measurements decreases correspondingly. If we use the criterion $p < 0.05$, the proper numbers N will be inside the green area, namely: 2; 3; and 5 for the sets of 10; 4; and 2 optotypes, correspondingly. The values of N for other probabilities of the erroneous measurements are shown in Figure 12, b. One could conclude that for the sets of four Landolt Cs or tumbling E (chance level 0.25), the values of p equal to 0.001; 0.0039; and 0.0155 will be obtained in the cases of $N=5$; $N=4$; and $N=3$, respectively. It is the task of the researcher to find a reasonable compromise between the accuracy and the duration of measurements.

It is impossible to scope all the aspects of the appropriate VA measurements for various purposes and in various conditions. However, it seems obligatory to dwell briefly on examination of patients with mental retardation and special needs. Since such patients are often characterized by significant limitations both in perceptual skills and intellectual functioning, it is very important to optimize the examination procedures and tools in order to avoid failure and waste of time. That is why the information about usability of each

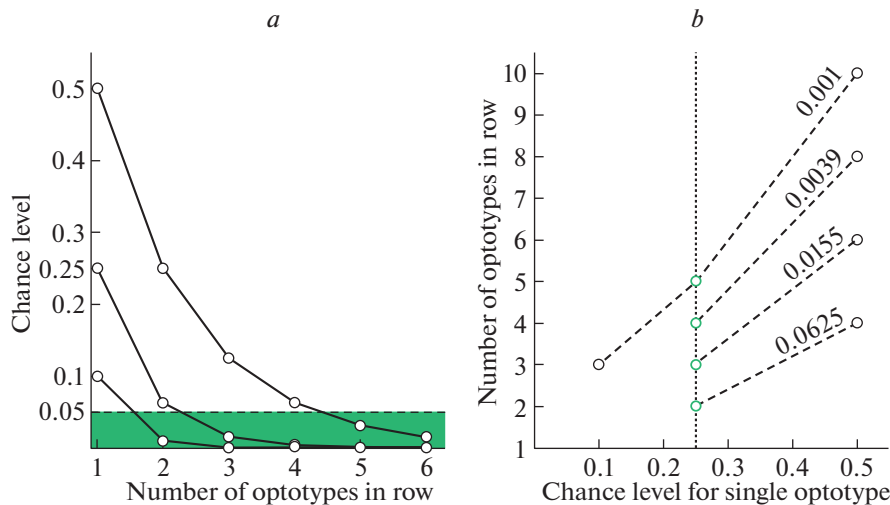


Fig. 12. Probability of erroneous VA measurement due to successful guessing at random.

a – Probability of correct responses to all the optotypes in the rows containing different numbers (1–6) of optotypes from the sets with 2; 4; and 10 optotypes of equal legibility (chance levels for single optotypes are 0.5; 0.25; and 0.1, respectively) in the case of guessing at random.

b – The numbers of the optotypes in the rows needed for reducing successful guessing at random (erroneous VA measurement) to 0.1%; 0.39%; 1.55%; and 6.25% of the population examined in the cases of the chance levels 0.1; 0.25; and 0.5 for single optotypes.

test is being collected and analyzed systematically to help the clinicians. An example of such an analysis taken from (Caywood, Nett, 2005) is presented in the Table 2. This Table contains a fragment of the larger Table from the indicated publication with ratings of various vision tests. We have only selected information related to several well known VA tests and concerning general integral ratings. Each test was subjectively ranked as to its appropriateness for a variety of handicaps including speech, sensory, and cognitive devel-

opmental impairments. The ranking criteria for the tests were: (1) not useful; (2) adequate, but may be difficult to perform or provide gross measurements; (3) may be appropriate, but other tests may provide more standardized results; (4) useful, provides standardized results and can be performed with relative ease. The data presented in the Table 2 evidence that the scores could significantly depend on the type of impairment and could be both increasing and decreas-

Table 2. Procedure ratings* for several VA tests by the specialists working with a variety of handicaps

Tests	Subjects					
	Hearing impairment Developmental age of 2 yrs	Motor impairment Developmental age of 2 yrs	Mute patient Developmental age of 2 yrs	Hearing impairment Developmental age of 6 yrs	Motor impairment Developmental age of 6 yrs	Mute patient Developmental age of 6 yrs
Snellen	1	1	1	4	4	4
HOTV	1	1	1	4	4	4
Lea symbols	4	4	4	3	3	3
Broken wheel	1	1	1	4	4	4
Teller acuity cards	4	4	4	2	2	2
Cardiff cards	4	4	4	2	2	2

*Ranking criteria for the tests:

1. Not useful.
2. The test is adequate, but may be difficult to perform or provide gross measurements.
3. The test may be appropriate, but other tests may provide more standardized results.
4. The test is useful, provides standardized results and can be performed with relative ease.

ing with age. Such information seems to be indispensable for regular examination of patients.

Concluding remarks

A general conclusion from this review is that establishing universal “golden standards” for the test images and for design of the VA charts is unrealistic and unnecessary. On the contrary, at present, it seems promising to spend more efforts on elaboration of specific optotypes and charts for various purposes.

Of course, it is very important to have some standard tools for regular population studies. However, with time, the standards become obsolete; and now existing international standards on visual testing procedures, optotypes, instruments, trueness and precision of measurements (ISO 8596; 8597; 5725-2) seem to be validated not so good in view of our contemporary knowledge of visual processing in the human visual system.

Moreover, standard methods of investigations can not reveal the early stages of visual impairments. In order to improve the whole system of vision care it is necessary to have a large variety of the VA measuring tools intended for vision monitoring and treatment.

In each case of the VA assessment, the optimal solution depends on the purpose of investigation, the characteristics of the individuals to be examined, and the conditions of measurements. The examiners have to understand the advantages and disadvantages of the chosen tests and take them into account both in planning the procedure and in interpretation of the results obtained.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Professor G. Paramei for her helpful comments and discussions, and A. Terekhin for technical assistance.

REFERENCES

- Allen H.F. A new picture series for preschool vision testing. *American Journal of Ophthalmology*. 1957. V. 44. P. 38–41. [https://doi.org/10.1016/0002-9394\(57\)91953-0](https://doi.org/10.1016/0002-9394(57)91953-0)
- Anderson R.S. Improving ophthalmic diagnosis in the clinic using the Moorfields Acuity Chart. *Expert Review of Ophthalmology*. 2017. V. 12 (6). P. 433–435. <https://doi.org/10.1080/17469899.2017.1395696>
- Anderson R.S., Thibos L.N. Relationship between acuity for gratings and for tumbling-E letters in peripheral vision. *Journal of the Optical Society of America A*. 1999a. V. 16 (10). P. 2321–2333. <https://doi.org/10.1364/josaa.16.002321>
- Anderson R.S., Thibos L.N. Sampling limits and critical bandwidth for letter discrimination in peripheral vision. *Journal of the Optical Society of America A*. 1999b. V. 16 (10). P. 2334–2342. <https://doi.org/10.1364/josaa.16.002334>
- Anderson R.S., Evans D.W., Thibos L.N. Effect of window size on detection acuity and resolution acuity for sinusoidal gratings in central and peripheral vision. *Journal of the Optical Society of America A*. 1996. V. 13 (4). P. 697–706. <https://doi.org/10.1364/josaa.13.000697>
- Atkinson J. *The developing visual brain*. N.Y.: Oxford Univ. Press. 2000. 211 p.
- Bailey I.L., Lovie J.E. New design principles for visual acuity letter charts. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*. 1976. V. 53 (11). P. 740–745. <https://doi.org/10.1097/00006324-197611000-00006>
- Bailey I.L., Lovie-Kitchin J.E. Visual acuity testing. From the laboratory to the clinic. *Vision Research*. 2013. V. 90. P. 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.05.004>
- Bondarko V.M., Danilova M.V. What spatial frequency do we use to detect the orientation of a Landolt C? *Vision Research*. 1997. V. 37 (15). P. 2153–2156. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00024-2)
- Campbell F.W., Green D.G. Optical and retinal factors affecting visual resolution. *The Journal of Physiology*. 1965. V. 181. P. 576–593. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1965.sp007784>
- Campbell F.W., Robson J.G. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *The Journal of Physiology*. 1968. V. 197. P. 551–566. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1968.sp008574>
- Caywood J., Nett J. Optometric assessment of the patient with mental retardation or special needs. *College of Optometry*. 2005. 1503. <https://commons.pacificu.edu/opt/1503>
- Colenbrander A. Consilium Ophthalmologicum Universale Visual Functions Committee. Visual acuity measurement standard. *Italian Journal of Ophthalmology*. 1988. V. 2 (1). P. 1–15.
- Colenbrander A. The historical evolution of visual acuity measurement. *Visual Impairment Research*. 2008. V. 10 (2–3). P. 57–66. <https://doi.org/10.1080/1388235080263240>
- Curcio C.A., Sloan K.R., Kalina R.E., Hendrickson A.E. Human photoreceptor topography. *The Journal of Comparative Neurology*. 1990. V. 523 (292). P. 497–523. <https://doi.org/10.1002/cne.902920402>
- Dennett W.S. Test type. *Transactions of the American Ophthalmological Society*. 1886. V. 4. P. 133–139.
- Donders F.C. On the anomalies of accommodation and refraction. *New Sydenham Society, London*. 1864.
- Doria C. À la recherche de la vision “normale” mesurer l’acuité visuelle au XIXe siècle. *Canadian Bulletin of Medical History*. 2020. V. 37 (1). P. 147–172. (in French) <https://doi.org/10.3138/cbmh.312-012019>
- Doria C. Searching for the normal vision. Measuring visual acuity in the 19th century. *Medicina Historica*. 2021. V. 5 (2). P. e2021015. Available from: <https://mattioli1885journals.com/index.php/MedHistor/article/view/90>
- Evans D.W., Wang Y., Haggerty K.M., & Thibos L.N. Effect of sampling array irregularity and window size on the discrimination of irregular gratings. *Vision Research*. 2010. V. 50 (1). P. 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.10.001>

- Fantz R.L., Ordy J.M., Udelf M.S. Maturation of pattern vision in infants during the first six months. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*. 1962. V. 55. P. 907–917.
<https://doi.org/10.1037/h0044173>
- Fariza E., Kronheim J., Medina A., Katsumi O. Testing visual acuity of children using vanishing optotypes. *Japanese journal of ophthalmology*. 1990. V. 34 (3). P. 314–319.
- Ferris F.L. III, Kassoff A., Bresnick G.H., Bailey I. New visual acuity charts for clinical research. *American journal of ophthalmology*. 1982. V. 94 (1). P. 91–96.
[https://doi.org/10.1016/0002-9394\(82\)90197-0](https://doi.org/10.1016/0002-9394(82)90197-0)
- Ferris F.L. III, Freidlin V., Kassoff A., Green S.B., Milton R.C. Relative letter and position difficulty on visual acuity charts from the Early Treatment Diabetic Retinopathy Study. *American Journal of Ophthalmology*. 1993. V. 116 (6). P. 735–740.
[https://doi.org/10.1016/S0002-9394\(14\)73474-9](https://doi.org/10.1016/S0002-9394(14)73474-9)
- Filin V.A. *Videoehkologiya* [Videoecology]. Moscow, Videoehkologiya. 2006. 512 p. (in Russian)
- Frisén L. Vanishing optotypes. New type of acuity test letters. *Archives of Ophthalmology*. 1986. V. 104 (8). P. 1194–1198.
<https://doi.org/10.1001/archophth.1986.01050200100060>
- Gräf M., Becker R. Determining visual acuity with LH symbols and Landolt rings. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*. 2008. V. 215 (2). P. 86–90.
<https://doi.org/10.1055/s-2008-1034677>
- Green J. On a new series of test-letters for determining the acuteness of vision. *Transactions of the American Ophthalmological Society*. 1868. V. 1 (4–5). P. 68–71.
- Hamm L.M., Anstice N.S., Black J.M., Dakin S.C. Recognition acuity in children measured using the Auckland Optotypes. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2018a. V. 38 (6). P. 596–608.
<https://doi.org/10.1111/opo.12590>
- Hamm L.M., Yeoman J.P., Anstice N.S., Dakin S.C. The Auckland Optotypes: an open-access pictogram set for measuring recognition acuity. *Journal of Vision*. 2018b. V. 18. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1167/18.3.13>
- Hamm L.M., Langridge F., Black J.M., Anstice N.S., Vuki M., Fakakovikaetau T., Grant C.C., Dakin S.C. Evaluation of vision screening of 5–15-year-old children in three Tongan schools: comparison of The Auckland Optotypes and Lea symbols. *Clinical and Experimental Optometry*. 2019. V. 103 (3). P. 353–360.
<https://doi.org/10.1111/cxo.12958>
- Held R., Gwiazda J., Brill S., Mohindra I., Wolfe J. Infant visual acuity is underestimated because near threshold gratings are not preferentially fixated. *Vision Research*. 1979. V. 19 (12). P. 1377–1379.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(79\)90210-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(79)90210-4)
- Heinrich S.P., Bach M. Resolution acuity versus recognition acuity with Landolt-style optotypes. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. 2013. V. 251 (9). P. 2235–41.
<https://doi.org/10.1007/s00417-013-2404-6>
- Hyvärinen L., Näsänen R., Laurinen P. New visual acuity test for pre-school children. *Acta Ophthalmologica*. 1980. V. 58 (4). P. 507–511.
<https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.1980.tb08291.x>
- ISO 8596. International Standard. Ophthalmic optics. Visual acuity testing. Standard optotype and its presentation. Geneva: International Standards Organization, 1994. (2nd edition: 2009).
- ISO 8597. International Standard. Optics and optical instruments. Visual acuity testing. Method of correlating optotypes. Geneva: International Standards Organization, 1994.
- ISO 5725-2. International Standard. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Basic methods for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. International Standards Organization, Geneva, 1994.
- Jaeger E. *Ueber die Pruefung des Sehvermoegens bei Gesunden wie Kranken in Ueber Staar und Staaroperationen*. 1854. Wien.
- Kay H. New method of assessing visual acuity with pictures. *British Journal of Ophthalmology*. 1983. V. 67. P. 131–133.
<https://doi.org/10.1136/bjo.67.2.131>
- Kazakova A., Gracheva M., Rozhkova G., Pokrovskiy D.F., Medvedev I.B. Novel visual acuity charts with modified 3-bar optotypes: approbation in cataract patients. *Proc. of The 12th conference of the Lithuanian Neuroscience Association*. 2020. P. 36.
- Kholina A. Novaya tablitsa dlya issledovaniya ostroty zreniya [A new chart for visual acuity assessment]. *Russkii oftal'mologicheskii zhurnal*. 1930. V. 11 (1). P. 42–47. (in Russian).
- Kniestedt C., Stamper R. L. Visual acuity and its measurement. *Ophthalmology Clinics of North America*. 2003. V. 16 (2). P. 155–170.
[https://doi.org/10.1016/s0896-1549\(03\)00013-0](https://doi.org/10.1016/s0896-1549(03)00013-0)
- Koskin S.A., Boiko É.V., Sobolev A.F. Shelepin Yu.E. Mechanisms of recognition of the outlines of “vanishing” optotypes. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2007. V. 37. P. 59–65.
<https://doi.org/10.1007/s11055-007-0150-0>
- Koskin S.A. *Sistema opredeleniya ostroty zreniya v tselyakh vrachebnoi ekspertizy* [The systems of visual acuity measurements for medical examination]. *MD diss*, 2009. *St Petersburg*. (in Russian).
- Landolt E. Méthode optométrique simple. *Bulletins et Memoires de la Société Française d'Ophthalmologie*. 1888. V. 6. P. 213–214.
- Lebedev D.S., Belozzerov A.E., Rozhkova G.I. *Optotipy dlya tochnoi otsenki ostroty zreniya* [Optotypes for an accurate assessment of visual acuity]. Patent RF. No. 2447826. 2012.
- Lebedev D.S. Model mekhanizma raspoznavaniya orientatsii 3-polosnykh dvukhgradatsionnykh optotipov [A model of orientation recognition mechanisms for the 3-bar two-grade optotypes]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2015. V. 29 (4). P. 309–320.
- Lippmann O. Vision of young children. *Archives of Ophthalmology*. 1969. V. 81. P. 763–775.
- Lippmann O. Vision screening of young children. *American journal of Public Health*. 1971. V. 61. P. 1586–1601.

- Linksz A., John Green, the AOS, and the reasonable notation of visual acuity measurements. *Transactions of the American Ophthalmological Society*. 1972. V. 70. P. 314–327.
- Marg E., Freeman D.N. Visual acuity and sensitive period. *Proceedings of the Fourth Symposium on Sensory Physiology*. Leningrad, Academy of Sciences USSR IP Pavlov Institute of Physiology. 1976. P. 124–132.
- Mayer D.L., Beiser A.S., Warner A.F., Pratt E.M., Kaye K.N., Lang J.M. Monocular acuity norms for the Teller acuity cards between ages one month and four years. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 1995. V. 36 (3). P. 671–685.
- Mayer D.L., Dobson V. Assessment of vision in young children: A new operant approach yields estimates of acuity. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 1980. V. 19. P. 566–570.
- Mayer D.L., Dobson V. Visual acuity development in infants and young children, as assessed by operant preferential looking. *Vision Research*. 1982. V. 22. P. 1141–1151.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(82\)90079-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90079-7)
- Miller W.H., Bernard G.D. Averaging over the foveal receptor aperture curtails aliasing. *Vision research*. 1983. V. 23 (12). P. 1365–1369.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(83\)90147-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(83)90147-5)
- Moiseenko G.A., Pronin S.V., Zhil'chuk D.I., Koskin S.A., Shelepin Yu.E. Vanishing optotypes and objective measurement of human visual acuity. *Journal of Optical Technology*. 2020. V. 87 (12). P. 761–766.
<https://doi.org/10.1364/JOT.87.000761>
- Monoyer F. Echelle typographique d'ecimale pour mesurer l'acuit'e visuelle. *Gaz. Med. Paris*. 1875. V. 21. P. 258.
- Norcia A.M., Tyler C.W. Spatial frequency sweep VEP: visual acuity during the first year of life. *Vision Research*. 1985. V. 25 (10). P. 1399–1408.
- Plainis S., Tzatzala P., Orphanos Y., Tsilimbaris M.K. A modified ETDRS visual acuity chart for European-wide use. *Optometry and Vision Science*. 2007. V. 84 (7). P. 647–653.
- Pugmire G.E., Sheridan M.D. Test types for very young or mentally backward children. *Med Officer*. 1930. V. 43. P. 133–134.
- Pugmire G.E., Sheridan M.D. Revised vision screening chart for very young or retarded children. *Med Officer*. 1957. V. 98. P. 53–55.
- Richman J.E., Petito G.T., Cron M.T. Brocken wheel acuity test: A new and valid test for preschool and exceptional children. *Journal of the American Optometric Association*. 1984. V. 55. P. 561–565.
- Rozhkova G.I., Belozarov A.E., Lebedev D.S. Izmerenie ostroty zreniya: neodnoznachnost' vliyaniya nizkочастотных составляющих спектра Fur'e optotipov [Visual acuity measurement: uncertain effect of the low-frequency components of the optotype Fourier-spectra]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2012. V. 26 (2). V. 160–171. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Gracheva M., Lebedev D.S. Optimizatsiya testovykh znakov i tablits dlya izmereniya ostroty zreniya [Optimisation of the test symbols and charts for visual acuity measurements]. *Nevskiye gorizonty*. 2014. P. 563–567.
- Rozhkova G.I., Lebedev D., Gracheva M., Rychkova S. Optimal optotype structure for monitoring visual acuity. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B*. 2017. V. 71 (5). P. 20–30.
<https://doi.org/10.1515/prolas-2017-0057>
- Rozhkova G.I., Gracheva M.A. Paramei G.V. An overview of the visual acuity assessment. 1. Primary measures and various notations. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2021. V. 35(3). P. 179–198.
<https://doi.org/10.318/SO235009221030033>
- Shah N., Dakin S.C., Anderson R. Effect of optical defocus on detection and recognition of vanishing optotype letters in the fovea and periphery. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 1996. V. 37 (11). P. 7063–7070.
<https://doi.org/10.1167/iovs.12-9864>
- Shah N., Dakin S.C., Redmond T., Anderson R.S. Vanishing Optotype acuity: repeatability and effect of the number of alternatives. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2011. V. 31 (1). P. 17–22.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2010.00806.x>
- Shah N., Laidlaw D.A.H., Brown G., Robson C. Effect of letter separation on computerised visual acuity measurements: Comparison with the gold standard Early Treatment Diabetic Retinopathy Study (ETDRS) chart. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2010. V. 30 (2). P. 200–203.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2009.00700.x>
- Shah N., Dakin S.C., Dobinson S., Tufail A., Egan C.A., Anderson R.S. Visual acuity loss in patients with age-related macular degeneration measured using a novel high-pass letter chart. *British Journal of Ophthalmology*. 2016. V. 100 (10). P. 1346–1352.
<https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2015-307375>
- Shamshinova A.M., Volkov V.V. *Funktsional'nye metody issledovaniya v oftal'mologii* [Functional methods of diagnostics in ophthalmology]. Moscow, Meditsina. 1999. 416 p.
- Sheridan M.D. Vision screening of very young or handicapped children. *British medical journal*. 1960. V. 2 (5196), 453–456.
<https://dx.doi.org/10.1136%2Fbmj.2.5196.453>
- Sloan L.L. New test charts for the measurement of visual acuity at far and near distances. *American Journal of Ophthalmology*. 1959. V. 48 (6). P. 807–813.
[https://doi.org/10.1016/0002-9394\(59\)90626-9](https://doi.org/10.1016/0002-9394(59)90626-9)
- Snellen H. *Test-types for the determination of the acuteness of vision*. Utrecht: P. W. van de Weijer. 1862.
- Snyder A.W., Miller W.H. Photoreceptor diameter and spacing for highest resolving power. *Journal of the Optical Society of America*. 1977. V. 67 (5). P. 696–698.
<https://doi.org/10.1364/JOSA.67.000696>
- Stiers P., Vanderkelen R., Vandenbussche E. Optotype and grating visual acuity in preschool children. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2003. V. 44 (9). P. 4123–4130.
<https://doi.org/10.1167/iovs.02-0739>
- Stiers P., Vanderkelen R., Vandenbussche E. Optotype and grating visual acuity in patients with ocular and cerebral visual impairment. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2004. V. 45 (12). P. 4333–4339.
<https://doi.org/10.1167/iovs.03-0822>

- Taylor H.R. Applying new design principles to the construction of an illiterate E chart. 1978. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*. 55: 348–351. <https://doi.org/10.1097/00006324-197805000-00008>
- Teller D. The forced-choice preferential looking procedure: A psychophysical technique for use with human infants. *Infant Behavior and Development*. 1979. V. 2. P. 135–153. [https://doi.org/10.1016/S0163-6383\(79\)80016-8](https://doi.org/10.1016/S0163-6383(79)80016-8)
- Teller D. Measurement of visual acuity in human and monkey infants: The interface between laboratory and clinic. *Behavioural Brain Research*. 1983. V. 10. P. 15–23. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(83\)90146-8](https://doi.org/10.1016/0166-4328(83)90146-8)
- Teller D. First glances: The vision of infants. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. 1997. V. 38. P. 2183–2203.
- Teller D., Mayer D.L., Makous W.L., Allen J.L. Do preferential looking techniques underestimate infant visual acuity? *Vision Research*. 1982. V. 22 (8). P. 1017–1024. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(82\)90038-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90038-4)
- USAF-1951. United States Air Force 3-bar resolution test chart.
- Watson A.B., Ahumada A.J. Predicting visual acuity from wavefront aberrations. *Journal of Vision*. 2008. V. 8 (4). P. 1–19. <https://doi.org/10.1167/8.4.17>
- Watson A.B., Ahumada A.J. Modeling acuity for optotypes varying in complexity. *Journal of Vision*. 2012. V. 12 (10). P. 1–19. <https://doi.org/10.1167/12.10.19>
- Wen Y., Chen Z., Zuo C., Yang Y., Xu J., Kong Y., Cheng H., Yu M. Low-contrast high-pass visual acuity might help to detect glaucoma damage: a structure-function analysis. *Frontiers in Medicine*. 2021. V. 8. 680823. <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.680823>
- Westheimer G. Chapter 7: Visual acuity and spatial modulation thresholds. *Handbook of sensory physiology*. 1972. P. 170–187.
- Wollman K. A brief history of optotype. 2020. URL: <https://mattjensenmarketing.com/brief-history-optotype/> (accessed 23.06.2021).

Оценка остроты зрения. 2. Теоретические и клинические требования к оптотипам и дизайну таблиц

Г. И. Рожкова^{a, #}, М. А. Грачева^a, А. А. Казакова^{a, b}

^a Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, 127051 Москва, Б. Каретный пер., 19/1, Россия

^b Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова Минздрава России, 117997 Москва, ул. Островитянова, д. 1, Россия

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

Статья посвящена анализу и обсуждению существующих тестовых изображений для оценки остроты зрения – оптотипов – и их размещения в таблицах. После изложения истории появления и эволюции оптотипов сделана попытка их классификации и анализа направлений их совершенствования. Рассмотрены следующие разновидности оптотипов: буквы, однородные конфигурации, периодические паттерны, исчезающие оптотипы, рисунки простых предметов и тестовые стимулы, включенные в более крупные изображения. Сформулированы общие теоретические и практические требования к оптотипам. Более детально проанализированы и обсуждены специфические достоинства и недостатки ряда популярных оптотипов. В последнем разделе рассмотрена история создания таблиц для оценки остроты зрения и совершенствования их дизайна. Сделано заключение, что единых универсальных “золотых стандартов” ни для оптотипов, ни для дизайна таблиц не существует: их оптимальная структура зависит от цели исследования, характеристик исследуемого контингента и квалификации исследователей. В любом случае исследователи должны иметь представление о достоинствах и недостатках выбранных тестов и принимать их во внимание, как при разработке протокола процедуры, так и при интерпретации получаемых результатов.

Ключевые слова: разновидности оптотипов, таблицы для оценки остроты зрения, классификация оптотипов, совершенствование оптотипов

УДК 612.843.631 + 612.844.21

ОЦЕНКА ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕСТИРОВАНИЯ

© 2022 г. А. В. Белокопытов^{1,*}, Г. И. Рожкова¹, М. А. Грачева¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,
127051 Москва, Большой Каретный переулок, д. 19, стр. 1, Россия

*E-mail: abelokopytov@gmail.com

Поступила в редакцию 02.09.2021 г.

После доработки 14.10.2021 г.

Принята к публикации 09.11.2021 г.

Оценка периферической остроты зрения (ОЗ) связана с необходимостью раздваивать внимание между фовеальным фиксационным стимулом и периферическим тестовым стимулом. Одним из подходов к исключению задачи центральной фиксации является создание искусственной центральной скотомы при помощи контактной линзы с имплантированным окклюдером (диаметром 4–5 мм). Применяя этот подход, мы измерили периферическую ОЗ у трех испытуемых в диапазоне эксцентриситетов до 60° на специально сконструированной компьютеризированной периметрической установке, используя различные оптоотипы — “кувыркающиеся-Е” и модифицированные трехполосные стимулы. Оказалось, что в условиях наших экспериментов окклюзия фиксационного стимула сама по себе не привела к ожидаемому увеличению ОЗ, вероятно потому, что эффект инструкции “смотреть прямо перед собой” аналогичен эффекту инструкции “фиксировать видимый фовеальный стимул”. Более того, можно предполагать, что контактная линза с окклюдером оказывает негативное влияние из-за затенения периферического тестового стимула в случаях неконтролируемого произвольного уменьшения диаметра зрачка, приводящего к значительному увеличению слепой зоны. У всех испытуемых значения периферической ОЗ оказались несколько выше для модифицированных трехполосных оптоотипов, измеряющих “остроту разрешения”, чем для “кувыркающихся-Е”, измеряющих “остроту распознавания”. Межиндивидуальная изменчивость данных оказалась больше при меньших значениях эксцентриситета.

Ключевые слова: периферическое зрение, оптоотипы, острота зрения, острота разрешения, острота распознавания, контактная линза с окклюдером, межиндивидуальные различия

DOI: 10.31857/S0235009222010024

ВВЕДЕНИЕ

Оценке остроты зрения (ОЗ) человека посвящено огромное число публикаций, но в подавляющем большинстве экспериментальных и клинических работ исследования касались только центрального зрения, точнее — фовеального, т.е. они относились к области поля зрения диаметром порядка 5°, составляющей лишь незначительную его часть. В то же время периферическое зрение играет в жизни человека не меньшую роль, и необходимость оценки его возможностей в последние годы становится все актуальнее. Это связано с тем, что во всех цивилизованных странах растет число людей пожилого возраста, у которых одной из самых распространенных глазных болезней является возрастная макулярная дегенерация (ВМД/AMD: age-related macular degeneration), число случаев которой к 2020 г. прогнозировалось на уровне 200 млн человек (Wong et al., 2014). Это заболевание ведет к затруднению привычной еже-

дневной зрительной активности — чтения, работы с компьютером, просмотра телепередач, к невозможности вождения автомобиля и общему снижению качества жизни (Williams et al., 1998; Hassell et al., 2006), ВМД также вызывает депрессию (Augustin et al., 2007). Очевидно, что такая тревожная ситуация с центральным зрением заставляет обратить большее внимание на исследование возможностей периферического зрения в плане частичной компенсации утрачиваемых функций макулярной сетчатки.

Исследования периферического зрения и, в частности, его разрешающей способности, определяющей точность возможного анализа сетчаточных изображений, немногочисленны (Wertheim, 1894; 1980; Low, 1943; 1946a; 1946b; 1951; Anderson et al., 1996; Anderson, Thibos, 1999a; 1999b), хотя видимая человеком картина окружения обычно занимает все поле зрения, имеющее протяженность более 180° по горизонтальному мери-

диану и около 100° по вертикальному. Такая ситуация может показаться странной, однако специалисты хорошо знают, что она связана с многочисленными психофизиологическими и техническими сложностями проведения экспериментов по исследованию восприятия зрительных стимулов на периферии поля зрения. Эти специфические сложности затрудняют получение надежных данных и проведение массовых измерений. Основные трудности объясняются тем, что для исследования периферического зрения приходится менять привычный режим работы зрительной системы, при котором в естественных условиях зрительного восприятия центральные (фовеальные) и периферические механизмы зрения выполняют несколько разные функции и динамически взаимодействуют, дополняя друг друга для решения общих задач (Stewart, 2020).

Среди первых систематических исследований периферической ОЗ наиболее авторитетной и фундаментальной считается работа Вертхайма (Wertheim, 1894; 1980). Краткое резюме статьи Вертхайма приведено в обзоре (Рожкова и др., 2019). После пионерской работы Вертхайма, включающей измерения только для левого глаза автора, но в широком диапазоне эксцентриситетов (от 55° по горизонтальному меридиану в назальной половине поля зрения до 70° в темпоральной половине; по вертикальному меридиану – до 40° вверх и вниз), лишь в 1943 г. было предпринято относительно массовое исследование периферической ОЗ, обусловленное нуждами военной авиации. Фрэнк Лоу был первым ученым, кто провел измерения периферической ОЗ у большого числа испытуемых (сто человек – 200 глаз), как в фотопических условиях наблюдения (Low, 1943), так и в скотопических условиях (Low, 1946a). Интересно, что данные Вертхайма оказались близки к средним значениям, вычисленным Лоу. Как и Вертхайм, Лоу отметил влияние тренировки на измерения периферической ОЗ: уже при втором измерении значения оказались выше, чем при первом. Изучению этого эффекта Лоу посвятил специальную серию экспериментов (Low, 1946b). В обзоре исследований периферической ОЗ, выполненных до 1950 г., Лоу подытожил свои результаты и дал глубокий анализ работ других авторов (Low, 1951).

После работ Лоу 1940-х годов, в которых использовалась очень простая аппаратура, масштабных исследований периферической ОЗ, по-видимому, не предпринималось. В отдельных проводимых исследованиях авторы сильно усложняли экспериментальные установки, что не позволяло провести измерения на большом количестве испытуемых. Например, в работе (Johnson, Leibowitz, 1979) оценка периферической ОЗ была проведена только у четырех испытуемых.

Возросшие технические возможности позволили изучать периферическое зрение при движении стимулов, и ввести понятия статической (SVA – Static Visual Acuity) и динамической (DVA – Dynamic Visual Acuity) ОЗ. Подробный анализ отличий DVA от SVA на зрительной периферии дан в диссертации (Holland, 2000).

В других основательных работах Андерсон и соав. (Anderson et al., 1996; Anderson, Thibos, 1999a, b) оценивали периферическую ОЗ с использованием тестовых стимулов разной формы – синусоидальных решеток, трехполосных стимулов и “кувыркающихся E”. Сравнивали значения периферической ОЗ, получаемые при оценке обнаружения, разрешения и распознавания стимулов, но все измерения были проведены только для двух испытуемых.

Изучение периферической оптики глаза показывает, что она обеспечивает хорошее качество фокусировки на периферии, поэтому периферическая ОЗ не ограничивается оптикой глаза, а определяется плотностью фоторецепторов и нейронными механизмами (см. обзор Strasburger, 2011).

Хорошо известно, что обычно зрительная сенсорная система функционирует в тесном взаимодействии с глазодвигательной системой, которая обеспечивает фовеацию – наведение взора на объекты, представляющие потенциальный интерес, и последовательный анализ всего поля зрения за счет перевода взора с одной области рассматриваемой сцены на другую. Очевидно, что при этом каждый поворот глаза должен соответствовать исходному эксцентриситету очередного объекта внимания и должен приводить к попаданию изображения объекта в фовеа, т.е. к обнулению эксцентриситета. В то же время для оценки периферической ОЗ необходимо обеспечить сохранение эксцентриситета периферического тестового стимула в течение всего времени его анализа, что требует от испытуемого определенных усилий. Для сохранения эксцентриситета предъявляемого периферического тестового стимула испытуемого обычно заставляют воспринимать этот стимул в условиях вынужденной фиксации взора на вспомогательном фовеальном стимуле. Таким образом, при оценке периферической ОЗ испытуемый должен одновременно решать две зрительные задачи: удерживать взор на центральной фиксации метке и анализировать периферический тестовый стимул. Очевидно, что внимание испытуемого в этих условиях должно раздваиваться, что может оказывать негативное влияние на узнавание тестового стимула, как само по себе (из-за деления ресурсов мозговых механизмов переработки информации), так и из-за необходимости противодействовать естественному желанию повернуть глаз на анализируемый те-

стовый стимул. Большинство имеющихся данных по оценке периферической ОЗ получено именно в таких условиях (традиционная методика).

Примечательно, что одним из первых изучение возможностей периферического зрения предпринял Г. Гельмгольц, который показал, что в условиях фиксации взора на центральном стимуле человек может воспринимать текст, кратковременно освещаемый вспышкой, на периферии поля зрения (Helmholtz, 1896). При этом было отмечено, что текст удается прочитать только в тех случаях, когда человек умственным усилием концентрирует свое внимание именно на месте предъявления периферического текста. Из этих опытов Гельмгольц сделал вывод, что существует механизм пространственного перемещения внимания независимо от движения глаз.

С 1960-х годов в ряде исследований периферического зрения делается акцент на раздвоение внимания в обычных условиях тестирования. Соответственно, появилась целая ветвь психологии, использующая специфику периферического зрения для изучения механизмов внимания. Например, в работе (Jeneou, 2018) на основе оценки периферической ОЗ была сделана попытка исследовать влияние сотрясения мозга на механизмы раздвоения внимания. Было обследовано 22 хоккеиста, связи обнаружено не было.

В середине прошлого века была предложена принципиально иная парадигма для исследования периферического зрения, не подразумевающая разделения внимания: она заключалась в блокировании информации, поступающей из центра поля зрения, при помощи окклюдера (Riggs, Schick, 1968; Ярбус, Рожкова, 1977), т.е. как бы в создании искусственной центральной скотомы. В работе (Riggs, Schick, 1968) авторы использовали в качестве окклюдера имплантированное внутрь склеральной линзы маленькое плоское зеркальце, которое также служило для записи движений глаз. В работе (Ярбус, Рожкова, 1977) на глаз испытуемого устанавливались присоски сложной конструкции с окклюдерирующими устройствами. Из-за технических трудностей реализации и/или возникающего у испытуемых дискомфорта указанные методики не нашли широкого распространения и не были использованы в опытах по оценке периферической ОЗ, требующих достаточно большого времени для проведения измерений.

Позже были предложены другие реализации идеи имитации центральной скотомы, основанные на использовании контактных линз разной конструкции (Walonker, Diddie, 1981; Foley-Fisher, Murphy, 1987; Butt et al., 2015; Almutleb et al., 2018). В частности, разрабатывался и совершенствовался метод нанесения на контактную линзу непрозрачной краски (Sivak et al., 1985; Czoski-Murray et al.,

2009; Nau, 2012; Butt et al., 2015; Iomdina et al., 2020). В ходе этих работ было установлено, что создать абсолютную центральную скотому небольшого стабильного размера (для имитации макулярной дегенерации), используя закрашивание центра линзы, трудно, так как угловой размер окклюдера должен быть больше углового размера входного зрачка, но не слишком большим (чтобы перекрывалась только макулярная область). Помимо этого, выяснилось, что постоянные флуктуации размера зрачка ведут к пульсирующим изменениям размера скотомы. В удачных попытках стабильного затемнения достаточно большой желаемой области использовали либо большие (8–12 мм) окклюдеры (Nau, 2012; Iomdina et al., 2020), либо медикаментозное сужение зрачка (Czoski-Murray et al., 2009).

Принципиально другой подход – создание виртуальной центральной скотомы бесконтактными методами. Он подразумевает использование компьютерных систем, отслеживающих движения глаз и позволяющих исключать из зрительного анализа центральную зону вокруг точки, на которую в данный момент направлен взор испытуемого, генерируя там однородное поле (Rayner, Bertera, 1979; Lingnau, 2005; Bernard et al., 2007; Marmor, Marmor, 2010; Jordan et al., 2012). При движениях глаз эта пустая зона остается неподвижной в центре сетчатки, и тем самым посредством программного исключения информации имитируется “зрение без фовеа”. Однако и эта методика не была использована для оценки ОЗ, так как подразумевает проведение измерений в условиях координации системы бесконтактной регистрации движений глаз и системы предъявления периферических стимулов. К сожалению, возможности использования этого подхода ограничены, во-первых, необходимостью работы с высокоточным оборудованием для регистрации движений глаз, которое требует соответствующей квалификации сотрудников и постоянной калибровки, а во-вторых, относительно небольшими размерами рабочей части поля зрения, границы которой определяются размерами монитора.

В настоящей статье приведены результаты оценки периферической ОЗ, полученные двумя методами: традиционным методом с фиксацией взора на фовеальном стимуле, и методом, основанным на использовании контактной линзы с центральным окклюдером (КЛ+О). Мы исследовали зависимость результатов от использованного метода, от типа тестового стимула, от эксцентриситета в поле зрения, а также оценивали индивидуальную вариабельность данных.

МЕТОДЫ

Испытуемые. В экспериментах участвовали трое испытуемых – две женщины (30 и 48 лет) и

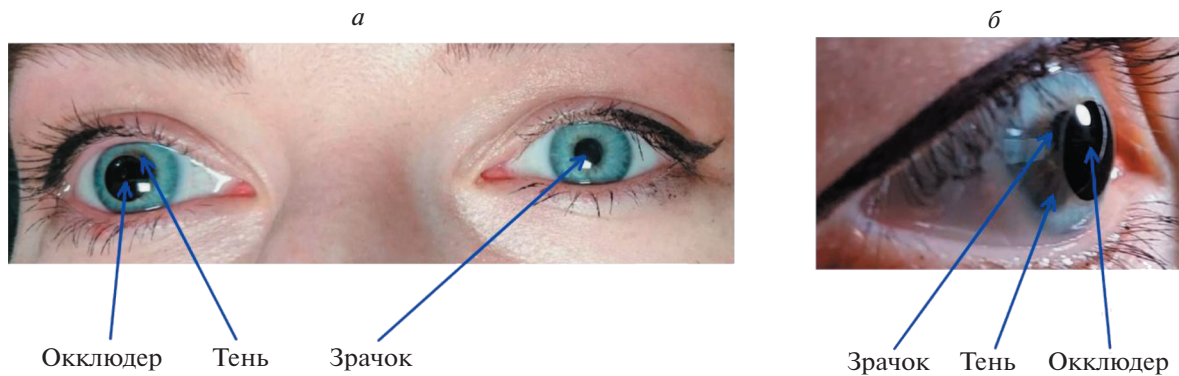


Рис. 1. Изображения глаза испытуемого с надетой контактной линзой (диаметр имплантированного окклюдера 5 мм).
а – фотография испытуемого анфас с контактной линзой на правом глазу;
б – кадр видеозаписи (вид сбоку с височной стороны), поясняющий образование тени от окклюдера на радужке.

один мужчина (19 лет). Из-за значительной продолжительности экспериментов и необходимости изготовления специальных индивидуальных контактных линз с имплантированными окклюдерами разного диаметра привлечение большего числа испытуемых в рамках данной работы не представлялось возможным. Исследование проводили с соблюдением требований Хельсинкской декларации 1975 г. Протоколы проведения экспериментов были одобрены этическим комитетом ИППИ РАН.

Контактные линзы. Индивидуальные контактные линзы с имплантированными окклюдерами диаметром 3, 4 и 5 мм были изготовлены по специальному заказу в Отделении контактной коррекции зрения ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней имени Гельмгольца” Министерства здравоохранения Российской Федерации. В предыдущих экспериментах (Iomdina et al., 2020) мы столкнулись с эффектом децентрации (сползания) линз, поэтому изготовлению новых линз было уделено особое внимание. Геометрические характеристики линз выбраны на основе измерений глаз испытуемых. Мягкие корнеосклеральные линзы с двумя радиусами кривизны были изготовлены методом точения. Линзы не корректировали рефракцию. Окклюдер был изготовлен методом нанесения на центральную зону линзы нескольких слоев фоточувствительного красителя на основе серебра, в процессе изготовления линза засвечивалась специальной лампой, далее проводили проявление и закрепление красителя. Проверку того, что окклюдер не пропускает свет, проводили в затемненной комнате, предлагая испытуемому смотреть на яркий компактный источник света.

Фотография глаз испытуемого с контактной линзой на правом глазу приведена на рис. 1, *а*.

Судя по фотографии, окклюдер должен был полностью перекрывать невидимый правый зрачок, размер которого должен соответствовать размеру видимого зрачка левого глаза, который явно меньше окклюдера. Однако вызвала сомнение темная зона на радужке, которую можно было принять за изображение расширенного правого зрачка. Поскольку это противоречило данным физиологической оптики, мы решили уточнить ситуацию при помощи видеосъемки, освещая глаз испытуемого с разных сторон. Съемка показала, что размеры правого и левого зрачков одинаковы, а подозрительная темная зона – это тень от окклюдера на радужке (кадр видеозаписи на *б*). Видеозапись можно скачать по ссылке:

<https://github.com/abelokopytov/PeripheralAcuity/raw/main/OccluderShadow.mp4>

Окклюдер создавал полностью перекрытую центральную зону, размеры которой зависели от его диаметра и параметров глаза: кривизны роговицы, глубины передней камеры и диаметра зрачка (Iomdina et al., 2020).

Схематические изображения глаза с надетой контактной линзой и ход лучей от тест-объекта при разных значениях эксцентриситета показаны на рис. 2 для разных размеров окклюдера и зрачка. Параллельными линиями показаны пучки лучей, попадающих от периферического объекта на роговицу при соответствующих значениях эксцентриситета.

Как видно из схем левой колонки, при относительно большом диаметре окклюдера (5 мм) и типичной величине зрачка (3 мм) падающие от периферического стимула на роговицу глаза лучи, которые в отсутствие окклюдера прошли бы через зрачок, до эксцентриситета 30° практически целиком перекрываются, а затем перекрываются частично (схемы для эксцентриситетов 40, 50 и 60°). Схемы центральной колонки рис. 2 показывают, что уменьшение диаметра окклюдера с пяти

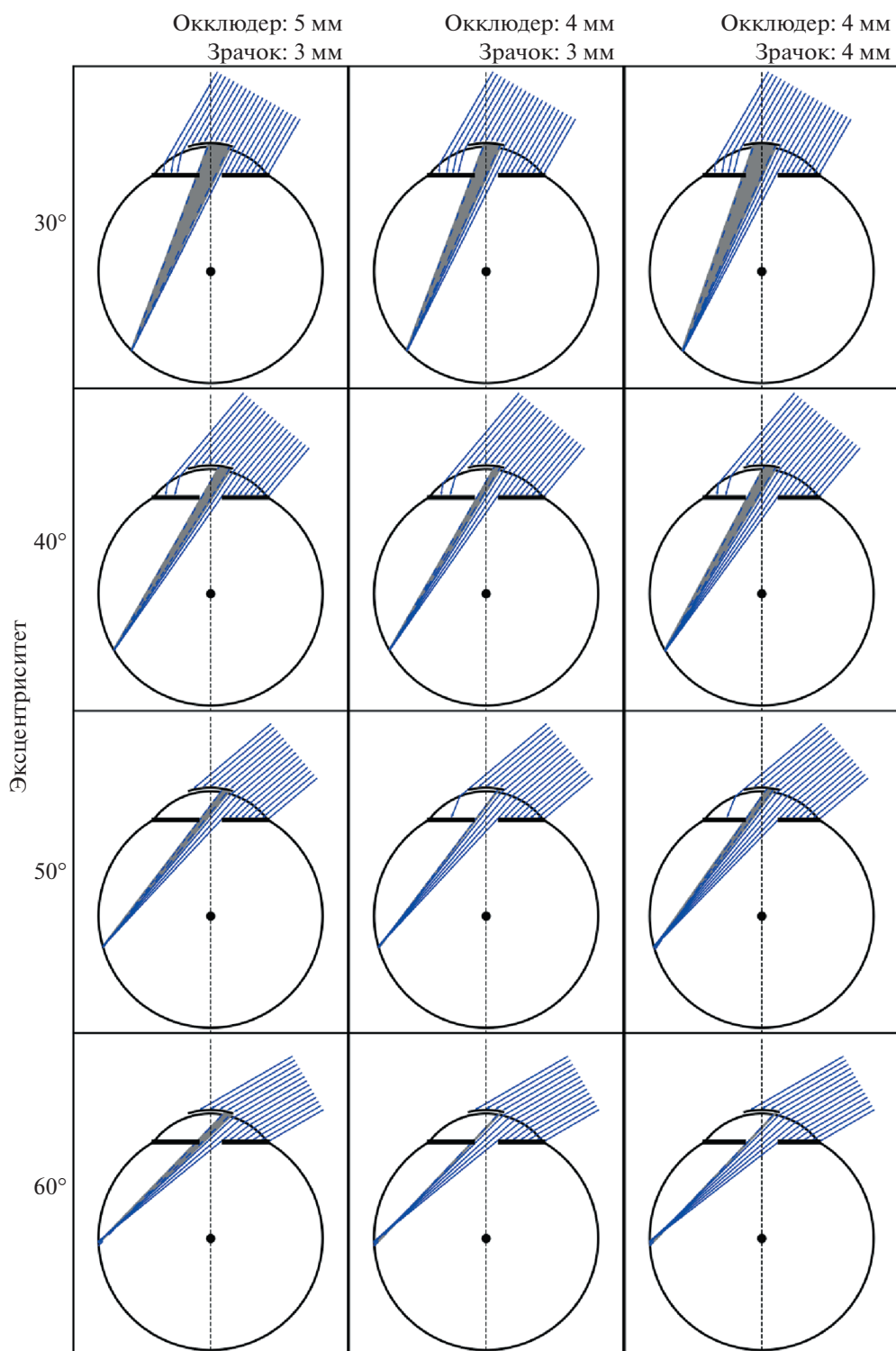


Рис. 2. Схематическая иллюстрация влияний размеров окклюдера и зрачка на световые потоки от периферических стимулов.

до четырех миллиметров приводит к существенному уменьшению перекрытия: теперь при эксцентриситете стимула 30° полного перекрытия уже нет, при эксцентриситете 40° частичное пере-

крытие значительно меньше, чем при прежнем окклюдере, а при значениях эксцентриситета 50 и 60° перекрытие совсем отсутствует. Схемы правой колонки демонстрируют влияние расшире-

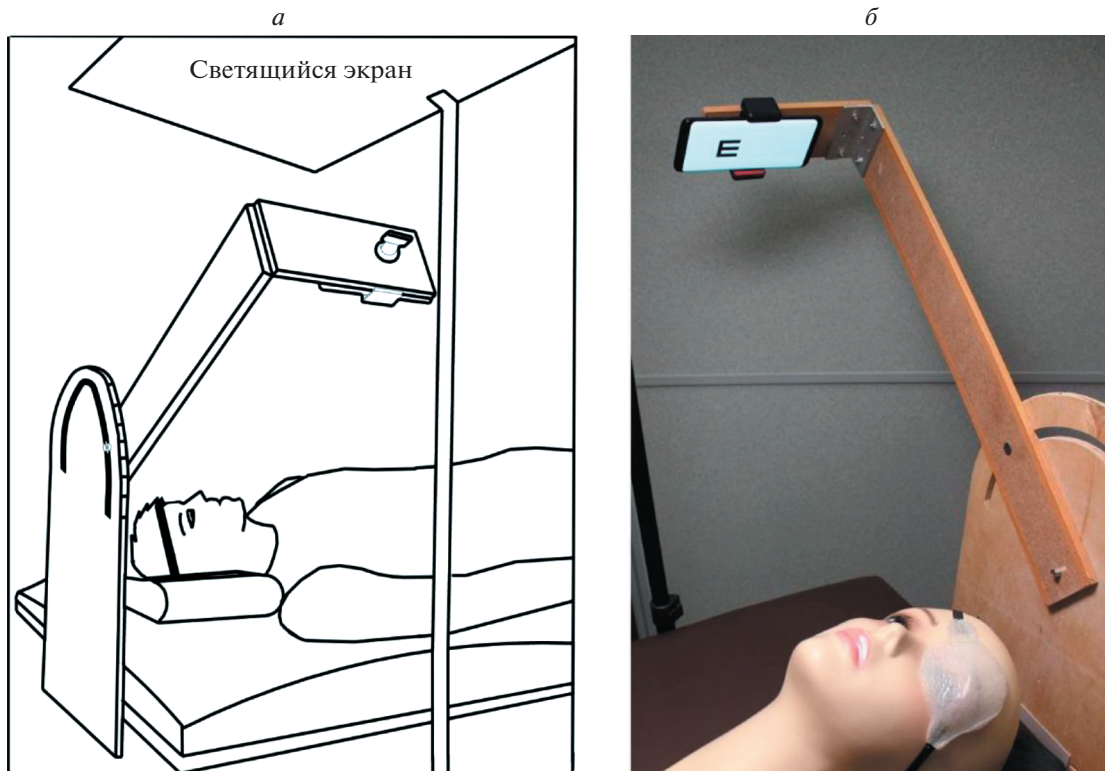


Рис. 3. Экспериментальная установка.
a – общая схема; *б* – фотография с манекеном на месте испытуемого.

ния зрачка. Оно приводит к увеличению светового потока, поступающего от стимула на сетчатку, при всех значениях эксцентриситета.

Ход лучей был рассчитан в рамках простейшей модели, учитывающей преломление световых лучей только на поверхности роговицы и не учитывающей преломляющее действие хрусталика, которое для косых лучей существенно меньше, чем для параксиальных. Примечательно, что эта модель дает результаты, схожие с результатами расчетов по более сложной модели широкоугольной оптики глаза (Simpson, 2017; 2021). Разработанный нами программный код доступен по ссылке:

<https://github.com/abelokopytov/PeripheralAcuity/blob/main/eyeRays.py>.

Экспериментальная установка. Для предъявления визуальных стимулов с различным эксцентриситетом (30–40–50–60°) использовали оригинальную периметрическую установку. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Измерения проводили в положении испытуемого лежа на спине, чтобы уменьшить вероятность сползания линзы вниз под действием силы тяжести.

Стимулы предъявлялись на смартфоне, укрепленном на специальной выносной подвижной раме. Рама могла менять положение, перемещая смартфон по дуге окружности на расстоянии 50 см от правого глаза испытуемого и меняя эксцентриситет от 0 до 90° (рис. 3, *a*). На рис. (3, *б*) для наглядности представлена фотография установки с манекеном, имитирующим испытуемого: видно тестовый стимул на смартфоне, повязку на левом глазу испытуемого.

Тестовые стимулы и программа для их предъявления. В экспериментальных сессиях использовались последовательно два набора оптоотипов (модифицированные трехполосные и “кувыркающиеся E”) (рис. 4).



Рис. 4. Наборы тестовых стимулов, предъявляемых на смартфоне.
a – модифицированные трехполосные оптоотипы;
б – “кувыркающиеся E”.

Стимулы отображались на смартфоне с использованием оригинального программного обеспечения ТИП-ТОП (сертификат № 2014619697). Испытуемый работал в парадигме вынужденного выбора (без варианта ответа “не вижу”), давая отчет устно, и его ответы регистрировались экспериментатором при помощи клавиатуры. Такая процедура позволяла минимизировать движения испытуемого и нежелательные изменения его позиции.

В ходе тестирования положение каждого следующего стимула на смартфоне смещали вверх-вниз относительно предыдущего (примерно на размер одного стимула). Такое смещение позволяло устранить влияние предыдущего стимула. При исследованиях периферического зрения это смещение дополнительно позволяет более стабильно удерживать внимание на периферическом стимуле.

Размер экрана смартфона ограничивал максимальный угловой размер тестовых стимулов и тем самым предельное значение эксцентриситета.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительные эксперименты. В ходе предварительных экспериментов проводили тестирование испытуемого в положении сидя. В этих условиях имеется дополнительная возможность регистрировать движения глаз и контролировать стабильность фиксации взгляда испытуемого при задаче фиксации центрального стимула.

Для записи движений глаз использовалась установка фирмы SMI модель Hi-Speed 1250. В этой установке голова испытуемого находится в проеме колонны с видеокамерой и подбородником, что ограничивает темпоральное поле зрения испытуемого вдоль горизонтального меридиана углом 45° . Для измерения периферической ОЗ программа ТИП-ТОП запускалась на ноутбуке, а оптоототипы отображались на смартфоне Samsung Galaxy S8, который был повернут на 90° по отношению к позиции на схеме рис. 3, б и установлен на расстоянии 50 см от правого глаза испытуемого с эксцентриситетом 40° . Поворот смартфона необходим для того, чтобы позиция оптоототипа на экране смартфона изменялась по вертикали, сохраняя неизменным значение эксцентриситета по горизонтальному меридиану. Программа ТИП-ТОП была модифицирована таким образом, что при смене стимула она генерировала сообщение “Up” или “Down” и передавала его в управляющую программу установки SMI.

Эксперименты с записью движений глаз показали, что в условиях такой задачи значительных саккад и смещений взгляда испытуемого не было. Это иллюстрирует рис. 5, где показан фрагмент записи движений глаз одного из испытуемых с

надетой на правый глаз КЛ+О диаметром 5 мм. Небольшие подъемы в Y-координате положения взгляда испытуемого и всплески в X-координате соответствовали его устным отчетам об ориентации оптоототипа, при которых немного менялось положение глаз по вертикали. В условиях раздвоения внимания было признано нецелесообразным заставлять испытуемого тратить ресурсы внимания на решение еще одной задачи — обозначать ориентацию оптоототипа нажатием на соответствующую кнопку на клавиатуре.

В ходе проведения предварительных экспериментов выяснилось, что при сидячем положении испытуемого эпизодически наблюдается сползание линзы по вертикали, предположительно под действием силы тяжести. Поэтому было решено проводить эксперименты в положении испытуемого лежа на спине. Это позволило минимизировать сползание контактной линзы и смещение слепой зоны. Однако, к сожалению, в таком положении было невозможно проводить регистрацию движений глаз в наших условиях.

Процедура проведения экспериментов. Периферическая ОЗ всех трех испытуемых измерялась для темпорального поля зрения правого глаза в двух сериях экспериментов.

Серия I — традиционная методика. Испытуемый правым глазом смотрел на фиксационный стимул фовеально, при этом задачей испытуемого было распознавать периферический стимул; левый глаз испытуемого был закрыт повязкой.

Серия II — использование КЛ+О. На правый глаз испытуемого надевали КЛ+О, оставляя возможность наблюдать периферические объекты, но закрывая центральную зону; левый глаз испытуемого был открыт; испытуемого просили смотреть прямо перед собой; возможность наблюдать периферический стимул левым глазом (без контактной линзы) была заблокирована при помощи небольшой заслонки, помещенной между глазами.

Оценка размеров слепой зоны. Размеры слепой зоны, создаваемой контактной линзой с имплантированным окклюдером, сильно зависели от размера зрачка. Поэтому для стабилизации размеров зрачка в экспериментах использовался равномерно засвеченный полупрозрачный рассеивающий экран (рис. 3, а), создающий высокий уровень освещенности (500 люкс). При таком уровне освещения зависимость размера зрачка от освещенности выходит на плато (Watson, 2012).

Для оценки слепой зоны, создаваемой контактной линзой с окклюдером, использовались специальные линейки со шкалами, помещаемые на поверхность засвеченного экрана в начале эксперимента.

К сожалению, точно картировать слепую зону практически невозможно. Испытуемые сообщали о нечеткой границе слепой зоны: часто окклю-

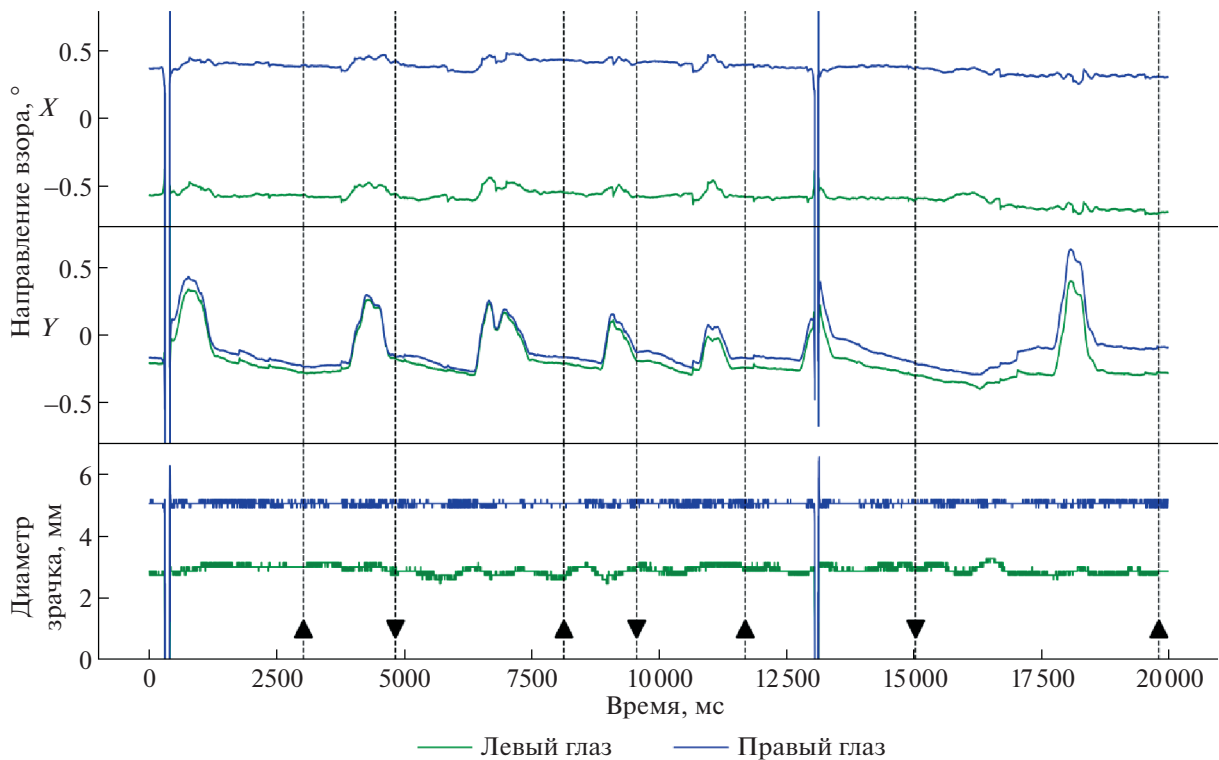


Рис. 5. Фрагмент записи движения глаз и флуктуации размера зрачков испытуемого с контактной линзой (диаметр окклюдера 5 мм) на правом глазу. Треугольниками разной ориентации показаны моменты смены стимула в программе ТИП-ТОП.

дер создавал не только зону полной слепоты, но и своеобразную “полупрозрачную” зону.

Поскольку окклюдер был фиксирован относительно глаза, его границы были стабилизированы на сетчатке, т.е. могли становиться так называемыми “энтоптическими объектами”. Это приводило к тому, что у некоторых испытуемых проявлялись феномены типа заполнения окружением (filling-in) пространства внутри слепой зоны.

Еще одним эффектом, существенно усложняющим оценку границ слепой зоны, были пульсации зрачка. Поскольку размер зрачка постоянно

флуктуирует, диаметр слепой зоны также непрерывно меняется.

Основные эксперименты. Для каждого испытуемого были получены оценки монокулярной ОЗ для близи (50 см) для периферического зрения (в диапазоне значений эксцентриситета 30–60°) и фовеального зрения (0°). Все измерения проведены на установке, описанной в разделе “Методика”, при положении испытуемого лежа на спине, что делает сопоставление фовеальных и периферических значений ОЗ корректным.

Значения фовеальной ОЗ у испытуемых существенно различались (табл. 1). В связи с этим для периферической ОЗ далее представлены как абсолютные значения (рис. 6, а), так и относительные (рис. 6, б).

Рисунок включает данные, полученные в двух разных сериях эксперимента, отличающихся условиями наблюдения тестовых стимулов. В серии I наблюдение было строго монокулярным, второй глаз был прикрыт повязкой. В серии II использовалась КЛ + О, закрывающая центральную зону зрения исследуемого глаза, а взгляд второго глаза был направлен вперед. Для обеих серий представлены данные оценки периферической ОЗ при помощи модифицированных трехполосных оптопов и оптопов “кувыркающиеся Е”.

Таблица 1. Фовеальная ОЗ для близи (50 см), измеренная в монокулярных условиях наблюдения при помощи разных оптопов. Данные для трех испытуемых

Испытуемый	ОЗ в десятичных единицах	
	по модифицированным трехполосным оптопов	по оптопам “кувыркающиеся Е”
И1	1.68	1.58
И2	0.84	0.72
И3	1.28	1.45

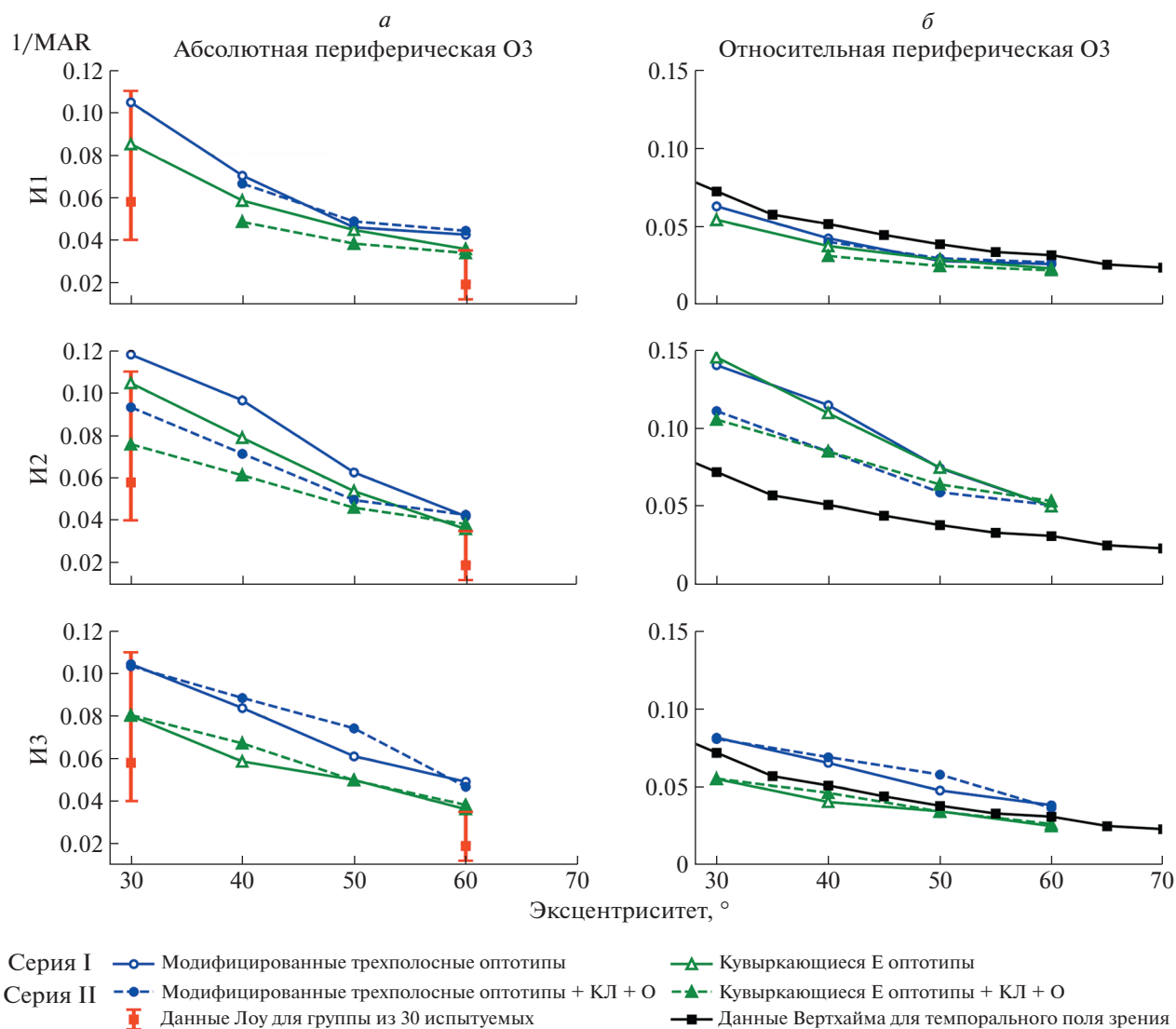


Рис. 6. Результаты измерений периферической ОЗ у трех испытуемых в различных экспериментальных условиях. Относительное значение периферической ОЗ означает отношение значения периферической ОЗ к фовеальной ОЗ. Добавлены данные Вертхайма из работы (Wertheim, 1894; 1980) и данные Лоу (Low, 1943) для средней величины и стандартных отклонений значений периферической ОЗ у 30 испытуемых, имеющих хорошие зрительные показатели.

В левой колонке рисунка представлены абсолютные значения периферической ОЗ испытуемых в единицах $1/MAR$, где MAR – minimum angle of resolution в правой колонке – относительные значения (по отношению к фовеальной ОЗ). Для сравнения, на графиках представлены также данные, полученные Вертхаймом (Wertheim, 1894; 1980) для значений эксцентриситета $30-70^\circ$, а на графиках левой колонки данные Лоу (Low, 1943) для подгруппы из 30 испытуемых, имевших хорошие зрительные показатели (в качестве тестовых стимулов Лоу использовал кольца Ландольта).

Из полученных данных видно, что в большинстве случаев значения периферической ОЗ при использовании модифицированных трехполос-

ных оптоотипов были несколько выше, чем при использовании оптоотипов “кувыркающиеся Е”.

Данные серии II (на графиках представлены пунктирными линиями), полученные при использовании КЛ+О, отличались от данных серии I, но по-разному у разных испытуемых.

У испытуемого И1 не удалось получить значения периферической ОЗ в серии II для эксцентриситета 30° , так как слепая зона, создаваемая КЛ + О, мешала наблюдению стимулов в этой части поля зрения. Значения, полученные по модифицированным трехполосным оптоотипам, были практически одинаковы в обеих сериях экспериментов. При использовании оптоотипов “кувыркающиеся Е” в серии II были получены значения

несколько меньше, чем в серии I. Относительные значения периферической ОЗ у испытуемого И1 были близки к данным Вертхайма, но несколько ниже.

У испытуемого И2 данные периферической ОЗ в серии II были ниже, чем в серии I, как для абсолютных, так и для относительных значений обоих оптоотипов. Причем все кривые в относительных единицах расположились значительно выше кривой Вертхайма.

У испытуемого И3 большее влияние на результаты оказали использованные оптоотипы, чем условия наблюдения. Видно, что кривые для одного и того же оптоотипа отличались по сериям несущественно. Данные для разных оптоотипов в обеих сериях оказались по разные стороны относительно кривой Вертхайма: кривые для модифицированных трехполосных оптоотипов идут несколько выше, а для оптоотипов “кувыркающиеся Е” — несколько ниже кривой Вертхайма.

Таким образом, можно констатировать, что КЛ + О (методика/парадигма серии II) не оказывала однозначного влияния на полученные результаты. В одних случаях использование КЛ + О приводило к повышению значений периферической ОЗ, в других — к понижению, а в третьих — не сказывалось на результатах.

ОБСУЖДЕНИЕ

В целом полученные значения периферической ОЗ мало отличались от данных других авторов, проводивших измерения при больших эксцентриситетах (Wertheim 1894; 1980; Low, 1943; Johnson, Leibowitz, 1979).

Эффект КЛ + О. Цель данной работы — приблизиться к условиям функционирования чисто периферического зрения, исключив влияние центрального зрения, которое, по нашей гипотезе, могло затруднять работу периферических механизмов, конкурируя за ресурсы внимания. Этой цели мы намеревались добиться, используя специально разработанные контактные линзы с имплантированным окклюдером.

Мы предполагали, что в условиях окклюзии центральной зоны при помощи КЛ + О периферическая ОЗ будет выше, так как в центральной зоне поля зрения не будет видимых стимулов, и, соответственно, не будет раздвоения внимания.

Оказалось, что окклюзия фиксационного стимула сама по себе не привела к ожидаемому увеличению измеренных значений периферической ОЗ, т.е. проведенные эксперименты не выявили ожидаемого позитивного влияния КЛ + О на измеряемую периферическую ОЗ.

Переход от традиционной стандартной парадигмы строгой фиксации взгляда на фовеальном стимуле с разделением внимания между централь-

ным фиксационным стимулом и периферическим тестовым к более мягкой парадигме удерживания направления взгляда по инструкции “смотри прямо перед собой” не дал ожидаемого эффекта.

Можно сделать вывод, что, задача “держать направление взгляда прямо перед собой” производила эффект, аналогичный задаче фиксации видимого фовеального стимула. Более того, контактная линза с окклюдером (диаметром 4 или 5 мм) может оказывать определенное негативное влияние, предположительно из-за затенения периферического тестового стимула в случаях неконтролируемого непровольного уменьшения диаметра зрачка, приводящего к значительному увеличению слепой зоны. У всех участников эксперимента значения периферической ОЗ оказались несколько выше для модифицированных трехполосных оптоотипов, измеряющих “остроту разрешения”, чем для “кувыркающихся Е”, измеряющих “остроту распознавания” (Anderson et al., 1999a). Различия между индивидуальными значениями ОЗ были выражены сильнее на ближней периферии. Для дальней периферии у всех испытуемых были примерно одинаковые значения периферической ОЗ.

Сравнение полученных значений периферической ОЗ с литературными данными. Полученные результаты частично согласуются с опубликованными ранее данными Вертхайма в отношении быстроты спадания ОЗ с увеличением эксцентриситета, но свидетельствуют о значительных индивидуальных особенностях.

Наиболее полное представление о межличностных различиях значений периферической ОЗ дает работа (Low, 1943), проведенная с использованием колец Ландольта в качестве тестовых стимулов. Его группа испытуемых в количестве ста человек была сформирована путем случайного набора: испытуемые различались по полу, возрасту, фовеальной ОЗ, цветовому зрению, аномалиям рефракции. Из этой группы Лоу выделил подгруппу лиц, удовлетворяющих требованиям приема в летное училище по зрительным показателям (30 мужчин 18–27 лет). Примечательно, что разница в показателях между основной группой и этой подгруппой оказалась незначительной. Неясно, в какой мере на приведенных показателях сказались тренировочные эффекты, упомянутые Лоу. Этому вопросу он посвятил специальную работу (Low, 1946b). Он организовал тренировку 43 испытуемых и нашел, что периферическая ОЗ в среднем улучшилась в 3 раза. Общая длительность тренировок составляла примерно 25 ч. При этом у лучшего по результатам тренировки испытуемого периферическая ОЗ возросла в 12 раз, а у худшего в 2 раза. Наиболее примечательной особенностью результатов тренировки были изменения, которые отмечали испытуемые в своем пе-

риферическом зрении в повседневной жизни. Заполняя специальный опросник, испытуемые указали различные ситуации, в которых заметили эти изменения, и анализ показал, что в подавляющем большинстве случаев эти изменения были полезны для испытуемых.

Позже Джонсон и Лейбович (Johnson, Leibowitz, 1979) также изучали эффект тренировки, появляющийся в процессе многократного измерения периферической ОЗ. Они использовали горизонтально ориентированные синусоидальные решетки и предъявляли их в течение 250 мс. Измерения проводились на четырех испытуемых, имевших большой опыт участия в психофизических экспериментах. С испытуемыми провели 11 сессий измерений периферической ОЗ при эксцентриситетах 0, 20, 40 и 60 град, каждая продолжительностью 1.5 ч. Результаты были представлены для каждой сессии. В среднем относительное уменьшение MAR составило 4.1% для фовеа, 41.2% для 20°, 38.3% для 40° и 45.7% для 60°. При этом большие различия между начальными и конечными значениями MAR наблюдались у трех испытуемых при эксцентриситете 60 град (вначале около 20, в конце около 12), а у четвертого испытуемого различия были небольшими (вначале 12, в конце 8). Джонсон и Лейбович подчеркнули, что при проведении измерений периферической ОЗ нужно учитывать эффект тренировки.

Дополнительные ограничения. Отчеты испытуемых об особенностях восприятия периферических тестовых стимулов в условиях проводимых экспериментов позволили выявить новые факторы, осложняющие оценку периферической ОЗ, которые ранее не принимались во внимание при разработке протокола исследования.

Получение повторных данных в условиях серии I могло затрудняться психологическим дискомфортом, связанным с продолжительной фиксацией фовеального стимула. В связи с этим приходилось делать паузы между измерениями, продолжительность которых определял сам испытуемый, закрывавший глаза после некоторой серии ответов и дававший сигнал “готов” для предъявления следующей серии тестовых стимулов.

При восприятии стимулов в условиях серии II нередко наблюдались пульсации слепой зоны и ее окаймления, по-видимому, связанные с произвольными изменениями диаметра зрачка. Ранее сильная зависимость размера слепой зоны от диаметра зрачка была выявлена при помощи моделирования (Iomdina et al., 2020). Поэтому от предъявления стимулов у края слепой зоны пришлось отказаться из-за нестабильности этого края и ограничить измерения значениями эксцентрисита-

та, надежно отстоящими от зоны нестабильной окклюзии.

Заключительные замечания. Анализируя результаты настоящего исследования и данные, полученные другими авторами в различных условиях эксперимента, можно заключить, что до настоящего времени не удалось найти метод, позволяющий эффективно выявлять потенциальные возможности механизмов периферического зрения в условиях без раздвоения внимания. Наши ожидания получить существенно лучшие показатели остроты зрения, реализуя парадигму “зрение без фовеа” при помощи контактных линз с имплантированными центральными окклюдерами, не подтвердились. В то же время имеющиеся в литературе данные о возможности повышения периферической ОЗ в несколько раз за счет не очень длительных тренировок указывают на перспективность дальнейших поисков в этом направлении.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность Гансу Страсбургеру за ценное обсуждение работы и Денису Явна за техническую помощь.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 19-015-00396).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Рожкова Г.И., Белокопытов А.В., Иомдина Е.Н. Современные представления о специфике периферического зрения человека. *Сенсорные системы*. 2019. Т. 33. № 4. С. 305–330.
<https://doi.org/10.1134/S0235009219040073>
- Ярбус А.Л., Рожкова Г.И. Особенности восприятия объектов на периферии поля зрения. *Сенсорные системы*. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние. 1977. С. 64–73.
- Almutleb E.S., Bradley A., Jedlicka J., Hassan S.E. Simulation of central scotoma using contact lenses with an opaque centre. *Ophthalm. Physiol. Opt.* 2018. V. 38 (1). P. 76–87.
<https://doi.org/10.1111/opo.12422>
- Anderson R.S., Evans D.W., Thibos L.N. Effect of window size on detection acuity and resolution acuity for sinusoidal gratings in central and peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1996. V. 13 (4). P. 697–706.
<https://doi.org/10.1364/josaa.13.000697>
- Anderson R.S., Thibos L.N. Relationship between acuity for gratings and for tumbling-E letters in peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999a. V. 16 (10). P. 2321–2333.
<https://doi.org/10.1364/josaa.16.002321>
- Anderson R.S., Thibos L.N. Sampling limits and critical bandwidth for letter discrimination in peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999b. V. 16 (10). P. 2334–2342.
<https://doi.org/10.1364/josaa.16.002334>

- Augustin A., Sahel J.A., Bandello F., Dardennes R., Maurel F., Negrini C., Hieke K., Berdeaux G. Anxiety and depression prevalence rates in age-related macular degeneration. *Invest. Ophthalmol. Vis Sci.* 2007. V. 48. P. 1498–1503.
<https://doi.org/10.1167/iovs.06-0761>
- Bernard J.B., Scherlen A.C., Castet E. Page mode reading with simulated scotomas: a modest effect of interline spacing on reading speed. *Vision Res.* 2007. V. 47. P. 3447–3459.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.10.005>
- Butt T., Crossland M.D., West P., Orr S.W., Rubin G.S. Simulation contact lenses for AMD health state utility values in NICE appraisals: a different reality. *Br. J. Ophthalmol.* 2015. V. 99. P. 540–544.
<https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2014-305802>
- Czoski-Murray C., Carlton J., Brazier J., Young T., Papo N.L., Kang H.K. Valuing condition-specific health states using simulation contact lenses. *Value Health.* 2009. V. 12. P. 793–799.
<https://doi.org/10.1111/j.1524-4733.2009.00527.x>
- Foley-Fisher J.A., Murphy K.S. Simulation of a retinal scotoma by a stabilized retinal image. *Ophthalmic Physiol Opt.* 1987. V. 7. P. 495–498.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.1987.tb00785.x>
- Hassell J.B., Lamoureux E.L., Keeffe J.E. Impact of age related macular degeneration on quality of life. *Br. J. Ophthalmol.* 2006. V. 90. P. 593–596.
<https://doi.org/10.1136/bjo.2005.086595>
- Helmholtz H. von. *Handbuch der Physiologischen Optik. Zweite umgearbeitete Auflage.* Hamburg und Leipzig, Verlag von Leopold Voss. 1896. 1334 P.
- Holland D.A. *Peripheral dynamic visual acuity under randomized tracking task difficulty, target velocities, and direction of target presentation.* Ph. D. dissertation. (Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000). URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/27297/DWIGHT.PDF?sequence=1&isAllowed=y>. (дата обращения: 20.04.2021).
- Iomdina E.N., Selina O.M., Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Ershov E.I. Contact lens with implanted occluder as a tool for assessment of far peripheral vision in natural viewing conditions. *Sensory systems.* 2020. V. 34 (2). P. 100–106.
<https://doi.org/10.31857/S0235009220020043>
- Johnson C.A., Leibowitz H.W. Practice effects for visual resolution in the periphery. *Percept Psychophys.* 1979. V. 25 (5). P. 439–442.
<https://doi.org/10.3758/bf03199854>
- Jenerou A., Raghundan A., Bush S. Divided visual attention performance of ice hockey players with history of concussion. *Vision Dev. & Rehab.* 2018. V. 4 (3). P. 121–127.
<https://doi.org/10.31707/VDR2018.4.3.p121>
- Jordan T.R., McGowan V.A., Paterson K.B. Reading with a filtered fovea: The influence of visual quality at the point of fixation during reading. *Psychon. Bull. Rev.* 2012. V. 19. P. 1078–1084.
<https://doi.org/10.3758/s13423-012-0307-x>
- Lingnau A. *Seeing without a fovea? Eye movements in reading and visual search with an artificial central scotoma.* Ph.D. dissertation (Technischen Universi-
tat Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2005). URL: <https://d-nb.info/974049999/34>. (дата обращения: 20.10.2021).
- Low F. The peripheral visual acuity of 100 subjects. *Am. J. Physiol.* 1943. V. 140 (1). P. 83–88.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1943.140.1.83>
- Low F. The peripheral visual acuity of 100 subjects under scotopic conditions. *Am. J. Physiol.* 1946a. V. 146 (1). P. 21–25.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1946.146.1.21>
- Low F. Some characteristics of peripheral visual performance. *Am. J. Physiol.* 1946b. V. 146(1). P. 573–584.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1946.146.4.573>
- Low F. Peripheral visual acuity. *AMA Arch. Ophthalmol.* 1951. V. 45 (1). P. 80–99.
<https://doi.org/10.1001/archophth.1951.01700010083011>
- Marmor D.J., Marmor M.F. Simulating vision with and without macular disease. *Arch. Ophthalmol.* 2010. V. 128. P. 117–125.
<https://doi.org/10.1001/archophthalmol>
- Nau A. A contact lens model to produce reversible visual field loss in healthy subjects. *Optometry.* 2012. V. 83. P. 279–284.
<https://doi.org/10.1111/opo.12422>
- Rayner K., Bertera J.H. Reading without a fovea. *Science.* 1979. V. 206. P. 468–469.
<https://doi.org/10.1126/science.504987>
- Riggs L.A., Schick A.M. Accuracy of retinal image stabilization achieved with a plane mirror on a tightly fitting contact lens. *Vision Res.* 1968. V. 8. P. 159–169.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(68\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(68)90004-7)
- Simpson M.J. Mini-review: Far peripheral vision. *Vision Res.* 2017. V. 140. P. 96–105.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.08.001>
- Simpson M.J. Scaling the retinal image of the wide-angle eye using the nodal point. *Photonics.* 2021. V. 8. P. 284.
<https://doi.org/10.3390/photonics8070284>
- Sivak B., Sivak J.G., MacKenzie C.L. Contact lens design for lateralizing visual input. *Neuropsychologia.* 1985. V. 23. P. 801–883.
[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(85\)90086-7](https://doi.org/10.1016/0028-3932(85)90086-7)
- Strasburger H., Rentschler I., Jüttner M. Peripheral vision and pattern recognition: a review. *J. of Vision.* 2011. V. 11 (13). P. 1–82.
<https://doi.org/10.1167/11.5.13>
- Stewart E.E.M., Valsecchi M., Schütz A.C. A review of interactions between peripheral and foveal vision. *J. of Vision.* 2020. V. 20 (12). P. 1–35.
<https://doi.org/10.1167/jov.20.12.2>
- Walonker A.F., Diddie K.R. Simulating decreased visual acuity with a contact lens system. *Am. J. Ophthalmol.* 1981. V. 92 (6). P. 863–864.
[https://doi.org/10.1016/s0002-9394\(14\)75645-4](https://doi.org/10.1016/s0002-9394(14)75645-4)
- Watson A.B., Yellott J.I. A unified formula for light-adapted pupil size. *J. of Vision.* 2012 V. 12 (10). P. 1–16.
<https://doi.org/10.1167/12.10.12>
- Wertheim T. (translated by Dunskey I.L. Original work published in 1894). Peripheral visual acuity. *American Journal of Optometry and Physiological Optics.* 1980. V. 57 (12). P. 915–924.

- Wertheim T. Über die indirekte Sehschärfe. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*. 1894. V. 7. P. 172–187. URL: <http://echo.mpiwg-ber-lin.mpg.de/MPIWG:YSKVNKH9> (дата обращения: 20.04.2021).
- Williams R.A., Brody B.L., Thomas R.G., Kaplan R.M., Brown S.I. The psychosocial impact of macular degeneration. *Arch. Ophthalmol.* 1998. V. 116. P. 514–520. <https://doi.org/10.1001/archophth.116.4.514>
- Wong W.L., Su X., Li X., Cheung C.M., Klein R., Cheng C.Y., Wong T.Y. Global prevalence of age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Glob Health*. 2014. V. 2. P. 106–116. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70145-1](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70145-1)

Assessment of peripheral visual acuity in various conditions of testing

A. V. Belokopytov^{a, #}, G. I. Rozhkova^a, and M. A. Gracheva^a

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

#E-mail: abelokopytov@gmail.com

In studies of peripheral visual acuity (VA), the main difficulties are caused by the necessity to divide attention between the foveal fixation stimulus and the peripheral test target. One of the approaches to exclude the task of central fixation is to create an artificial central scotoma by means of contact lens with implanted occluder. Applying this approach, we have measured the peripheral VA in 3 participants in the range of eccentricities up to 60° by means of two different optotypes – tumbling-E and modified 3-bar target – on a specially constructed computerized perimetric setup. It appeared that occlusion of the fixation stimulus *per se* did not lead to the anticipated increase in the VA, probably because the effect of the instruction “to keep gaze direction straight ahead” is similar to that of the instruction to fixate a visible foveal stimulus. More than that: contact lens with occluder (4–5 mm in diameter) could exert negative effect, supposedly due to veiling the peripheral test target in the cases of uncontrolled involuntary decrease of the pupil diameter leading to significant increase of the blind zone. In all participants, the peripheral VA values appeared to be somewhat better for the modified 3-bar optotypes measuring “resolution acuity” than for the tumbling-E measuring “recognition acuity”. The reliability of the data obtained for the peripheral VA was similar to that of the foveal data. Inter-individual variability of data was larger at lower eccentricities.

Key words: peripheral vision, optotypes, visual acuity, resolution acuity, recognition acuity, contact lens with occluder, inter-individual differences

REFERENCES

- Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Iomdina E.N. Sovremennye predstavleniya o spetsifike perifericheskogo zreniya cheloveka [Present view of the human peripheral vision specifics]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2019. V. 33 (4). P. 305–330 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0235009219040073>.
- Yarbus A.L., Rozhkova G.I. Osobennosti vospriyatiya ob"ektov na periferii polya zreniya [Features of perception of objects in the periphery of the visual field] *Sensornye sistemy* [Sensory Systems]. Leningrad, Nauka. 1977. P. 64–73 (in Russian).
- Almutleb E.S., Bradley A., Jedlicka J., Hassan S.E. Simulation of central scotoma using contact lenses with an opaque centre. *Ophthalmic Physiol. Opt.* 2018. V. 38 (1). P. 76–87. <https://doi.org/10.1111/opo.12422>.
- Anderson R.S., Evans D.W., Thibos L.N. Effect of window size on detection acuity and resolution acuity for sinusoidal gratings in central and peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1996. V. 13 (4). P. 697–706. <https://doi.org/10.1364/josaa.13.000697>.
- Anderson R.S., Thibos L.N. Relationship between acuity for gratings and for tumbling-E letters in peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999a. V. 16 (10). P. 2321–2333. <https://doi.org/10.1364/josaa.16.002321>.
- Anderson R.S., Thibos L.N. Sampling limits and critical bandwidth for letter discrimination in peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999b. V. 16 (10). P. 2334–2342. <https://doi.org/10.1364/josaa.16.002334>.
- Augustin A., Sahel J.A., Bandello F., Dardennes R., Maurel F., Negrini C., Hieke K., Berdeaux G. Anxiety and depression prevalence rates in age-related macular degeneration. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2007. V. 48. P. 1498–1503. <https://doi.org/10.1167/iovs.06-0761>.
- Bernard J.B., Scherlen A.C., Castet E. Page mode reading with simulated scotomas: a modest effect of interline spacing on reading speed. *Vision Res.* 2007. V. 47. P. 3447–3459. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.10.005>.
- Butt T., Crossland M.D., West P., Orr S.W., Rubin G.S. Simulation contact lenses for AMD health state utility values in NICE appraisals: a different reality. *Br. J. Ophthalmol.* 2015. V. 99. P. 540–544. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2014-305802>.
- Czoski-Murray C., Carlton J., Brazier J., Young T., Papo N.L., Kang H.K. Valuing condition-specific health states using simulation contact lenses. *Value Health.* 2009. V. 12. P. 793–799. <https://doi.org/10.1111/j.1524-4733.2009.00527.x>.

- Foley-Fisher J.A., Murphy K.S. Simulation of a retinal scotoma by a stabilized retinal image. *Ophthalm. Physiol Opt.* 1987. V. 7. P. 495–498.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.1987.tb00785.x>.
- Hassell J.B., Lamoureaux E.L., Keeffe J.E. Impact of age related macular degeneration on quality of life. *Br. J. Ophthalmol.* 2006. V. 90. P. 593–596.
<https://doi.org/10.1136/bjo.2005.086595>.
- Helmholtz H. von. *Handbuch der Physiologischen Optik. Zweite umgearbeitete Auflage.* Hamburg und Leipzig, Verlag von Leopold Voss. 1896. 1334 P.
- Holland D.A. Peripheral dynamic visual acuity under randomized tracking task difficulty, target velocities, and direction of target presentation. Ph. D. *dissertation.* (Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000). URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/27297/DWIGHT.PDF?sequence=1&isAllowed=y>. (accessed 20.10.2021).
- Iomdina E.N., Selina O.M., Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Ershov E.I. Contact lens with implanted occluder as a tool for assessment of far peripheral vision in natural viewing conditions. *Sensory systems.* 2020. V. 34 (2). P. 100–106.
<https://doi.org/10.31857/S0235009220020043>.
- Johnson C.A., Leibowitz H.W. Practice effects for visual resolution in the periphery. *Percept Psychophys.* 1979. V. 25 (5). P. 439–442.
<https://doi.org/10.3758/bf03199854>.
- Jenerou A., Raghundan A., Bush S. Divided visual attention performance of ice hockey players with history of concussion. *Vision Dev. & Rehab.* 2018. V. 4 (3). P. 121–127.
<https://doi.org/10.31707/VDR2018.4.3.p121>.
- Jordan T.R., McGowan V.A., Paterson K.B. Reading with a filtered fovea: The influence of visual quality at the point of fixation during reading. *Psychon. Bull. Rev.* 2012. V. 19. P. 1078–1084.
<https://doi.org/10.3758/s13423-012-0307-x>.
- Lingnau A. *Seeing without a fovea? Eye movements in reading and visual search with an artificial central scotoma.* Ph.D. dissertation (Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2005).
<https://d-nb.info/974049999/34> (accessed 20.10.2021).
- Low F. The peripheral visual acuity of 100 subjects. *Am. J. Physiol.* 1943. V. 140 (1). P. 83–88.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1943.140.1.83>.
- Low F. The peripheral visual acuity of 100 subjects under scotopic conditions. *Am. J. Physiol.* 1946a. V. 146 (1). P. 21–25.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1946.146.1.21>.
- Low F. Some characteristics of peripheral visual performance. *Am. J. Physiol.* 1946b. V. 146 (1). P. 573–584.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1946.146.4.573>.
- Low F. Peripheral visual acuity. *AMA Arch Ophthalmol.* 1951. V. 45 (1). P. 80–99.
<https://doi.org/10.1001/archophth.1951.01700010083011>.
- Marmor D.J., Marmor M.F. Simulating vision with and without macular disease. *Arch. Ophthalmol.* 2010. V. 128. P. 117–125.
<https://doi.org/10.1001/archophth.1001>.
- Nau A. A contact lens model to produce reversible visual field loss in healthy subjects. *Optometry.* 2012. V. 83. P. 279–284.
<https://doi.org/10.1111/opo.12422>.
- Rayner K., Bertera J.H. Reading without a fovea. *Science.* 1979. V. 206. P. 468–469.
<https://doi.org/10.1126/science.504987>.
- Riggs L.A., Schick A.M. Accuracy of retinal image stabilization achieved with a plane mirror on a tightly fitting contact lens. *Vision Res.* 1968. V. 8. P. 159–169.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(68\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(68)90004-7).
- Simpson M.J. Mini-review: Far peripheral vision. *Vision Res.* 2017. V. 140. P. 96–105.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.08.001>.
- Simpson M.J. Scaling the retinal image of the wide-angle eye using the nodal point. *Photonics.* 2021. V. 8. P. 284.
<https://doi.org/10.3390/photonics8070284>.
- Sivak B., Sivak J.G., MacKenzie C.L. Contact lens design for lateralizing visual input. *Neuropsychologia.* 1985. V. 23. P. 801–883.
[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(85\)90086-7](https://doi.org/10.1016/0028-3932(85)90086-7).
- Strasburger H., Rentschler I., Jüttner M. Peripheral vision and pattern recognition: a review. *J. Vision.* 2011. V. 11 (13). P. 1–82.
<https://doi.org/10.1167/11.5.13>.
- Stewart E.E.M., Valsecchi M., Schütz A.C. A review of interactions between peripheral and foveal vision. *J. Vision.* 2020. V. 20 (12). P. 1–35.
<https://doi.org/10.1167/jov.20.12.2>.
- Walonker A.F., Diddie K.R. Simulating decreased visual acuity with a contact lens system. *Am. J. Ophthalmol.* 1981. V. 92 (6). P. 863–864.
[https://doi.org/10.1016/s0002-9394\(14\)75645-4](https://doi.org/10.1016/s0002-9394(14)75645-4).
- Watson A.B., Yellott J.I. A unified formula for light-adapted pupil size. *J. Vision.* 2012. V. 12 (10). P. 1–16.
<https://doi.org/10.1167/12.10.12>.
- Wertheim T. (translated by Dunskey I.L. Original work published in 1894). Peripheral visual acuity. *Am. J. Optom. Physiol. Optics.* 1980. V. 57 (12). P. 915–924.
- Wertheim T. *Über die indirekte Sehschärfe.* Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. 1894. V. 7. P. 172–187. URL: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/MPIWG:YSKVNH9> (accessed 20.10.2021).
- Williams R.A., Brody B.L., Thomas R.G., Kaplan R.M., Brown S.I. The psychosocial impact of macular degeneration. *Arch. Ophthalmol.* 1998. V. 116. P. 514–520.
<https://doi.org/10.1001/archophth.116.4.514>.
- Wong W.L., Su X., Li X., Cheung C.M., Klein R., Cheng C.Y., Wong T.Y. Global prevalence of age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Glob. Health.* 2014. V. 2. P. 106–116.
[https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70145-1](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70145-1).

УДК 577.3

ЭКСПРЕССИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РОЛЬ СИГНАЛЬНЫХ БЕЛКОВ ОБОНЯТЕЛЬНОЙ, ВКУСОВОЙ И ФОТОТРАНСДУКЦИИ В БЕТА-КЛЕТКАХ ОСТРОВКОВ ЛАНГЕРГАНСА

© 2022 г. Ю. А. Ковалицкая¹, Н. П. Коваленко¹, М. Ф. Быстрова^{1,*}

¹ Институт биофизики клетки Российской академии наук,
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
“Федеральный исследовательский центр “Пушчинский научный центр биологических исследований РАН”
142290 г. Пушкино, ул. Институтская, д. 3, Россия

*E-mail: marinabystrova@rambler.ru

Поступила в редакцию 13.09.2021 г.

После доработки 30.09.2021 г.

Принята к публикации 26.10.2021 г.

Вкусовая, обонятельная и зрительная сенсорные системы обеспечивают рецепцию и распознавание физических и химических стимулов, возникающих в окружающей среде. Экспрессия сигнальных белков, вовлеченных во вкусовую, обонятельную и фототрансдукцию, обнаружена в бета-клетках островков Лангерганса поджелудочной железы млекопитающих, продуцирующих и секретирующих инсулин. Будучи впервые идентифицированными в обонятельных нейронах, вкусовых клетках, палочках и колбочках сетчатки, компоненты каскадов сенсорной трансдукции выполняют специфические функции в соответствующих сенсорных клетках. Роль этих молекул в физиологии бета-клеток до сих пор остается дискуссионной, а их экспрессия в отличие от экспрессии в специализированных сенсорных клетках носит не специфический, а эктопический характер. В настоящее время появились данные, показывающие, что сигнальные белки, вовлеченные в сенсорную трансдукцию, в бета-клетках могут участвовать в регуляции глюкозозависимой секреции инсулина. Обзор посвящен обобщению информации об экспрессии и функциональной активности элементов сенсорной трансдукции в бета-клетках млекопитающих, а также в модельных клеточных линиях инсулином мышей, крыс и хомяков, которые сохранили способность к синтезу и секреции инсулина.

Ключевые слова: бета-клетки, островки Лангерганса, секреция инсулина, эктопическая экспрессия, обонятельная трансдукция, вкусовая трансдукция, фототрансдукция

DOI: 10.31857/S0235009222010048

ВВЕДЕНИЕ

Вкусовая, обонятельная и зрительная системы обеспечивают рецепцию и распознавание физических и химических стимулов, возникающих в окружающей среде. В настоящее время экспрессия некоторых компонентов сигнальных каскадов вкусовой, обонятельной и фототрансдукции обнаружена в тканях и органах, не относящихся к сенсорным системам, в том числе в бета-клетках островков Лангерганса поджелудочной железы млекопитающих, синтезирующих и секретирующих инсулин. В отличие от экспрессии в специализированных рецепторных клетках сенсорных систем экспрессия компонентов вкусовой, обонятельной и фототрансдукции в бета-клетках носит не специфический, а эктопический характер. Хотя все клетки многоклеточного организма содержат одинаковый набор генов, их отличие друг от друга, определяющее функциональную специ-

ализацию каждой клетки, зависит от того, какие именно гены они экспрессируют. Экспрессия генов в многоклеточном организме находится под строгим контролем, который обеспечивает соответствие профиля транскриптов генов в каждой клетке ее функциональному статусу. Термин “эктопическая” определяет экспрессию гена в тех клетках, где кодируемый им белок не может выполнять известную для него специфическую функцию (Rodriguez-Trelles et al., 2005). Элементы трансдукции сигналов вкусовой, обонятельной и зрительной систем могут выполнять специфические сигнальные функции только будучи локализованными во вкусовых клетках, обонятельных нейронах, палочках и колбочках сетчатки. Роль этих молекул в физиологии бета-клеток до сих пор остается не до конца исследованной, однако она должна быть отлична от той, которую они играют в специфических сигнальных каскадах сен-

сорных клеток. В настоящее время появились данные, подтверждающие функциональную активность выявленных элементов сигнальных каскадов сенсорных систем в бета-клетках островков Лангерганса, а именно их участие в регуляции глюкозозависимой секреции инсулина. В обзоре дается краткое описание специфических сигнальных каскадов, функционирующих в специализированных сенсорных клетках вкусовой, обонятельной и зрительной систем. Затем представлена информация об экспрессии и возможной функциональной роли этих компонентов в бета-клетках островков Лангерганса поджелудочной железы млекопитающих, а также в модельных клеточных линиях инсулином мышей, крыс и хомяков, которые сохраняют способность к синтезу и глюкозозависимой секреции инсулина.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РОЛЬ БЕТА-КЛЕТОК ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Сахарный диабет – метаболическое заболевание, характеризующееся хронической гипергликемией, развивающейся вследствие нехватки инсулина (сахарный диабет I-го типа) или появления резистентности клеток-реципиентов к гормону, который вырабатывается бета-клетками островков Лангерганса поджелудочной железы (сахарный диабет II-го типа). По данным Всемирной организации здравоохранения за 2020 г. 422 млн человек во всем мире (около 7% населения) страдают от сахарного диабета, в основном второго типа. С конца 90-х годов прошлого века началось интенсивное изучение механизмов регуляции секреции инсулина и сигнальных каскадов, запускаемых при взаимодействии инсулина со специфическим рецептором. Особое внимание уделяется исследованиям молекулярных механизмов глюкозозависимой секреции инсулина бета-клетками островков Лангерганса поджелудочной железы.

Поджелудочная железа – это орган одновременно эндокринной и экзокринной систем. В состав железы входят ацинусы – образования, которые синтезируют и секретируют в протоки ферменты метаболизма белков, жиров и углеводов, и островки Лангерганса, обеспечивающие секрецию в кровь различных пептидных гормонов. Островки состоят из пяти типов клеток: бета-клетки (65–90%) секретируют инсулин; альфа-клетки (15–20%) – глюкагон; дельта-клетки (3–10%) – соматостатин; ПП-клетки (1%) – панкреатический полипептид; эпсилон клетки (1%) синтезируют греллин (Elayat et al., 1995; Da Silva Xavier, 2018). Островки Лангерганса человека и мышей различаются по своей пространственной организации, расположению и соотношению типов клеток (Dolensek et al., 2015). Микроархитектура островков мыши получила условное назва-

ние “модель ядро-мантия”: в центре островка находятся бета-клетки, а остальные типы клеток локализованы в мантийном слое на периферии островка. У человека наиболее часто встречаются следующие модели пространственной организации островков: бета-клетки образуют кластер в виде ленты; бета-клетки беспорядочно расположены по островку; модель “сэндвич”, которая состоит из двух тяжёлых альфа-клеток и одного бета-клеток, “сэндвич” свернут в виде подковы или замкнут в круг. Постоянный уровень глюкозы в плазме поддерживается за счет базовой секреции инсулина. При увеличении концентрации глюкозы в плазме, например, после еды, происходит глюкозозависимая секреция инсулина. Глюкоза попадает в бета-клетки через транспортер глюкозы на плазматической мембране. В клетке глюкокиназа фосфорилирует глюкозу и она подвергается гликолизу, в результате чего в цитоплазме из одной молекулы глюкозы образуются две молекулы пирувата. Взаимодействие пирувата с пируватдегидрогеназой приводит к образованию АТФ в дыхательной цепи. Увеличение отношения АТФ/АДФ инициирует ингибирование АТФ-зависимых K^+ -каналов (КАТФ-каналы), функционирующих в бета-клетках, что приводит к деполаризации их плазматической мембраны. Деполаризация мембраны приводит к открытию потенциал-зависимых Ca^{2+} каналов L-типа, обеспечивающих входящий ток ионов Ca^{2+} . Рост уровня Ca^{2+} в цитозоле увеличивает скорость экзоцитоза инсулина бета-клетками (Komatsu et al., 2013). Таким образом, активация глюкозозависимой секреции инсулина бета-клетками запускается закрытием АТФ-чувствительных КАТФ-каналов в ответ на увеличение соотношения внутриклеточного уровня АТФ/АДФ, индуцированного метаболизмом глюкозы, в результате повышения концентрации глюкозы в плазме крови. Поэтому считается, что КАТФ-зависимый путь внутриклеточной сигнализации является основным механизмом запуска глюкозозависимой секреции инсулина. Кроме того, есть гипотезы о возможности существования КАТФ-независимого пути секреции инсулина в ответ на повышение уровня глюкозы в плазме (Komatsu et al., 2013).

Механизм секреции инсулина в ответ на повышение уровня глюкозы в крови – объект пристального изучения ученых и фармакологов во всем мире. Однако выделение и поддержание культуры первичных бета-клеток в достаточном количестве для проведения необходимых исследований – непростая задача. Поэтому в экспериментах часто используют культуральные клеточные линии инсулином мышей (MIN6, β TC-1, β TC-3), крыс (INS-1, RINm5F) и хомяков (HIT-T15), которые сохранили способность к синтезу и секреции инсулина (Miyazaki et al., 1990, Ishihara et al., 1993).

СИГНАЛЬНЫЕ БЕЛКИ, ВОВЛЕЧЕННЫЕ ВО ВКУСОВУЮ РЕЦЕПЦИЮ

Вкусовая хемосенсорная система отвечает за рецепцию и распознавание молекул, определяющих вкус. Она представлена периферическим (вкусные почки), проводящим (волокна нейронов) и центральным (головной мозг) отделами. Экспериментально у млекопитающих выделено пять основных вкусовых ощущений: горький, сладкий, кислый, соленый и вкус аминокислот (умами). Рецепцию вкусовых стимулов осуществляют вкусовые клетки трех типов (I, II и III). Конгломерат из 50–100 вкусовых клеток образует вкусовую почку. Вкусные почки входят в состав специализированных образований – грибовидных, листовидных и желобоватых вкусовых сосочков языка. Вкусные клетки I-го типа составляют примерно половину всех вкусовых клеток почки (Roper, Chaudhari, 2017). В них обнаружена экспрессия эпителиальных натриевых каналов ENaC, и поэтому считается, что они вовлечены в рецепцию соленых веществ. Вкусные клетки II-го типа осуществляют детекцию сладких и горьких соединений, а также аминокислот. Содержание клеток II-го типа во вкусовой почке варьирует в пределах 30–40% (Roper, Chaudhari, 2017). Каждая вкусовая клетка II-го типа ответственна за детекцию стимулов только одной модальности: горького, сладкого или умами (Zhang et al., 2003). Клетки III-го типа составляют 2–20% (Roper, Chaudhari, 2017) от популяции вкусовых клеток в почке, они участвуют в рецепции кислых и соленых соединений. Это единственные вкусовые клетки, образующие классические синапсы с афферентными окончаниями вкусового нерва.

Трансдукция сигнала – это процесс, в ходе которого происходит распознавание внешнего стимула и его перекодирование во внутриклеточный сигнал, приводящий к специфическому клеточному ответу. Вкусная трансдукция – это совокупность событий от молекулярного узнавания вкусового вещества на апикальной мембране вкусовой клетки до выброса афферентного нейромедиатора, кодирующего сенсорную информацию. Во вкусовых клетках второго типа детекция вкусовых стимулов обеспечивается вкусовыми рецепторами, которые образуют два семейства. Рецепторы семейства T1R детектируют сладкие стимулы и аминокислоты, а рецепторы семейства T2R вовлечены в распознавание горьких веществ. Семейство рецепторов T1R состоит из трех представителей – T1R1, T1R2 и T1R3. Эти белки во вкусовых клетках II-го типа образуют функциональные гетеродимеры: T1R2/T1R3 – рецептор сладких веществ, T1R1/T1R3 – рецептор вкуса аминокислот. Семейство рецепторных белков T2R более обширно и включает до 30 представителей у

разных видов животных. Впервые они были описаны в 2000 г. (Adler et al., 2000).

Рецепторные белки T1R и T2R относятся к семейству рецепторов, сопряженных с G-белками (GPCR). Гетеротримерный G-белок состоит из α -, β - и γ -субъединиц. Специфичность взаимодействия G-белка с активированным GPCR-рецептором определяется α -субъединицей. При активации GPCR-рецептора происходит распад гетеротримера на α -субъединицу и $\beta\gamma$ -комплекс. Во вкусовых клетках II-го типа α -субъединица G-белка представлена α -гастдуцином, а $\beta\gamma$ -комплекс состоит из специфических для вкусовой ткани субъединиц $G_{\gamma 13}$ и $G_{\beta 1}$ (Rossler et al., 1998). Ген, кодирующий гастдуцин, входит в одно семейство с генами трансдуцина колбочек и трансдуцина палочек сетчатки. Во вкусовой ткани гастдуцин является специфическим маркером вкусовых клеток II-го типа. При помощи иммуногистохимии гастдуцин был обнаружен в клетках II-го типа во вкусовых почках желобоватого и грибовидного сосочков языка (Kim et al., 2003). Установлено, что гастдуцин участвует в трансдукции горьких и сладких стимулов (Wong et al., 1996). Интересно, что гастдуцин экспрессируется только в отдельной субпопуляции, а не во всех клетках II-го типа (Caicedo, 2003).

После диссоциации гетеротримерного G-белка комплекс субъединиц $G_{\gamma 13}G_{\beta 1}$ активирует фосфолипазу C $\beta 2$ (PLC $\beta 2$) (Rossler et al., 1998), катализирующую гидролиз PIP2 (phosphatidylinositol (4,5)-bisphosphate) на два медиатора: IP3 (inositol 1,4,5-triphosphate) и DAG (diacylglycerol). Вторичный посредник IP3 взаимодействует с рецептором IP3R3, который является лиганд-активируемым Ca^{2+} -каналом на эндоплазматическом ретикулуме. Увеличение уровня внутриклеточного кальция активирует ионные каналы TRPM5, открытие которых обеспечивает входящий ток ионов натрия, что приводит к генерации градуального рецепторного потенциала, деполяризующего клетку (Liman, 2007). Деполяризация цитоплазматической мембраны активирует потенциал-зависимые Na^+ -каналы и генерирует потенциал действия, приводящий к открытию потенциал-зависимых АТФ-проницаемых каналов и секреции АТФ вкусовыми клетками II-го типа (Romanov et al., 2008).

В последние годы появились данные, указывающие на существование еще одного базового вкуса млекопитающих. Это вкус ненасыщенных жирных кислот. За рецепцию этого вкуса отвечает небольшая популяция вкусовых клеток II-го типа, в которых выявлена экспрессия транслокатора жирных кислот CD36 и GPCR-рецепторов GPR40 и GPR120. Они рассматриваются как сенсорные элементы, определяющие содержание ненасы-

ценных жирных кислот в пище (Ichimura et al., 2014). Обнаружено, что у животных с инактивацией экспрессии генов, кодирующих CD36, GPR120 и GPR40, теряется предпочтение к пище, обогащенной жирными кислотами (Ozdener et al., 2014).

ЭКСПРЕССИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РОЛЬ ВКУСОВЫХ РЕЦЕПТОРОВ В ИНСУЛИН-СЕКРЕТИРУЮЩИХ КЛЕТКАХ

В настоящее время установлено, что некоторые компоненты сигнальных каскадов вкусовой рецепции экспрессируются в бета-клетках островков Лангерганса поджелудочной железы млекопитающих и в культуральных клетках инсулином, сохранивших способность секретировать инсулин. Наибольшее количество работ посвящено исследованию экспрессии вкусовых рецепторов семейства T1R, поскольку глюкоза, обладающая сладким вкусом, стимулирует секрецию инсулина бета-клетками. Впервые Накагава и соавт. обнаружили мРНК T1R2 и T1R3 в клетках мышинной инсулиномы MIN6 и в островках поджелудочной железы мышей, причем в островках уровень экспрессии был существенно ниже. На уровне белка в клетках MIN6 экспрессия была подтверждена при помощи иммуноцитохимических методов, при этом интенсивность сигнала для T1R3 была существенно выше, чем для T1R2. Однако при иммунофлуоресцентном анализе срезов поджелудочной железы мышей в инсулин-содержащих бета-клетках был обнаружен только T1R3, а T1R2 не детектирован (Nakagawa et al., 2009; Medina et al., 2014). Количественная оценка при помощи ОТ-ПЦР в реальном времени показала, что уровень экспрессии гена *T1R2* в островках поджелудочной железы мышей составляет менее 1% от уровня экспрессии *T1R3* (Medina et al., 2014). Кириази и соавт. детектировали мРНК обоих вкусовых рецепторов T1R2 и T1R3 в островках поджелудочной железы мышей и в островках поджелудочной железы человека, а также в клетках MIN6 (Kyriazis et al., 2012). Недавно Удагава и соавт. выявили мРНК транскрипты рецепторов T1R3 в островках мышей и крыс и в клеточных линиях MIN6 и INS-1, транскрипты T1R1 везде кроме островков, а экспрессия T1R2 не была обнаружена ни в одном из образцов (Udagawa et al., 2020). Таким образом, данные об экспрессии вкусовых рецепторов семейства T1R в инсулин-продуцирующих клетках остаются противоречивыми.

Функциональные исследования показали, что искусственные подсластители, являющиеся агонистами рецепторов сладкого вкуса во вкусовых клетках, сами по себе вызывают секрецию инсулина, а также усиливают глюкозозависимую секрецию инсулина в клетках MIN6 и в островках

(Nakagawa et al., 2009; 2014). В клетках MIN6 сукралоза стимулировала секрецию инсулина при низкой концентрации глюкозы 3 мМ, но не в присутствии 25 мМ глюкозы. Однако искусственные подсластители сахарин и ацесульфам калия усиливали секрецию инсулина, индуцированную 25 мМ глюкозы, в клетках MIN6. Сукралоза также стимулировала секрецию инсулина при низкой концентрации глюкозы в мышинных островках (Nakagawa et al., 2009). Стимулирующее действие фруктозы на глюкозозависимую секрецию инсулина было обнаружено в островках поджелудочной железы мышей и в островках поджелудочной железы человека (Kyriazis et al., 2012). Эти данные позволили сделать вывод о функциональной активности рецептора сладкого вкуса в бета-клетках и об его участии в регуляции глюкозозависимой секреции инсулина. Остается вопрос, какие вещества являются лигандами вкусовых рецепторов в инсулин-секретирующих клетках? Очевидным кандидатом в лиганды этих рецепторов в бета-клетках является глюкоза. Однако глюкозозависимая секреция инсулина обусловлена метаболизмом глюкозы. Накагава и соавт. предположили, что, взаимодействуя с рецептором T1R3, глюкоза способна активировать свой собственный метаболизм (Nakagawa et al., 2014). Учитывая, что рецепторы сладкого вкуса активируются соединениями, имеющими разную химическую структуру, также была выдвинута гипотеза, что, помимо глюкозы у них есть какие-то эндогенные лиганды и что эти лиганды способны модулировать функциональное состояние бета-клеток, взаимодействуя с вкусовыми рецепторами (Nakagawa et al., 2009).

При изучении действия четырех подсластителей — сукралозы, сахарина, ацесульфама калия и глицирризина обнаружено, что они индуцировали в клетках инсулиномы мышей MIN6 различные внутриклеточные ответы (Nakagawa et al., 2013). Ацесульфам калия и сукралоза вызывали повышение внутриклеточного уровня ионов Ca^{2+} и цАМФ. Глицирризин вызывал повышение внутриклеточного уровня ионов Ca^{2+} , но не влиял на уровень цАМФ, а сахарин индуцировал повышение уровня цАМФ, но не увеличивал уровень ионов Ca^{2+} . Эффекты ацесульфама калия и сукралозы отличались, несмотря на то, что они одинаково влияли на уровень внутриклеточного Ca^{2+} и цАМФ. Антагонист рецептора сладкого вкуса гурмарин, блокирующий гаструцинзависимый сигнальный путь во вкусовых клетках, и ингибитор G_q YM254890 подавляли повышение уровня ионов Ca^{2+} , вызванное сукралозой, но не влияли на Ca^{2+} -ответ, индуцированный ацесульфамом калия. Эти данные позволили предположить, что четыре искусственных подсластителя активируют различные сигнальные каскады в ин-

сулин-продуцирующих клетках (Nakagawa et al., 2013).

Во вкусовых клетках функциональный рецептор сладкого вкуса представляет собой гетеродимер T1R2/T1R3. По поводу существования такого гетеродимера в бета-клетках существуют различные точки зрения. Кириазис и соавт. предполагают, что в бета-клетках функциональный рецептор представлен гетеродимером T1R2/T1R3, как и во вкусовых клетках. Авторы обнаружили в бета-клетках экспрессию мРНК обоих генов *T1R2* и *T1R3*. Затем при помощи физиологических экспериментов им удалось получить доказательства участия обоих рецепторов T1R2 и T1R3 в детекции природного моносахарида фруктозы в бета-клетках островков Лангерганса поджелудочной железы мышей. Если в островках мышей дикого типа фруктоза вызывала повышение внутриклеточного уровня ионов Ca^{2+} и усиление индуцированной глюкозой секреции инсулина, то в островках мышей с нокаутом гена *T1R2* (*T1R2*^{-/-}) таких эффектов при действии фруктозы не наблюдалось. В изолированных островках поджелудочной железы человека фруктоза тоже вызывала усиление секреции инсулина, стимулированной глюкозой. При ингибировании рецептора T1R3 лактизолом реакция на фруктозу в островках поджелудочной железы человека отсутствовала. На основании проведенных экспериментов было предположено участие гетеродимера рецепторов T1R2/T1R3 в детекции фруктозы в бета-клетках островков поджелудочной железы (Kujawski et al., 2012).

Существует также гипотеза, что в бета-клетках может функционировать гомодимер рецептора T1R3. Для оценки участия каждого из рецепторов T1R2 и T1R3 в передаче сигналов подсластителей в клетках MIN6 при помощи мРНК подавлялась экспрессия либо *T1R2*, либо *T1R3*. При уменьшении экспрессии *T1R2* все эффекты, вызываемые подсластителями в клетках MIN6, сохранялись, в то время как нокаут *T1R3* эти эффекты блокировал (Nakagawa et al., 2014). Эти данные дают основание предположить, что гомодимер T1R3/T1R3 может функционировать в бета-клетках в качестве рецептора, детектирующего сладкие соединения.

Нельзя исключить, однако, гетеродимеризацию T1R3 с каким-то GPCR-рецептором, не относящимся к семейству T1R. Такой гетеродимер может формировать, например, T1R3 и рецептор экстраклеточного кальция CaSR (Kojima et al., 2017). Во-первых, известно, что CaSR экспрессируется в бета-клетках поджелудочной железы (Bruce et al., 1999; Tang et al., 2016). Во-вторых, обнаружено, что при гетерологической экспрессии в клетках HEK-293 CaSR активировался глюко-

зой в физиологических концентрациях, а также натуральными и искусственными подсластителями (Medina et al., 2016). При гетерологической экспрессии рекомбинантных T1R3 и CaSR в клетках HEK-293 глюкоза индуцировала повышение внутриклеточного уровня кальция. Этот эффект не зависел от метаболизма глюкозы и воспроизводился при замене глюкозы ее неметаболизируемым аналогом 3-О-метил-D-глюкозы. В бета-клетках и клетках MIN6 действие 3-О-метил-D-глюкозы блокировалось как ингибитором рецептора T1R3 лактизолом, так и ингибитором рецептора CaSR NPS-2143, что свидетельствует об участии обоих рецепторов в детекции 3-О-метил-D-глюкозы. Таким образом, было предположено, что гетеродимер T1R3/CaSR может выполнять в бета-клетках роль функционального рецептора, детектирующего сладкие соединения (Kojima et al., 2017).

Исследование островков поджелудочной железы мышей в состоянии натощак и островков поджелудочной железы мышей после приема пищи, а также островков мышей и островков крыс с модельным сахарным диабетом и ожирением показали, что уровень экспрессии рецептора T1R3 зависит от условий питания и метаболического состояния животных (Medina et al., 2014). При помощи иммуноблоттинга и иммуногистохимии обнаружено, что после приема пищи в островках мышей уровень T1R3 значительно снижен (примерно на 80%) по сравнению с островками голодных мышей. Такое снижение наблюдалось уже через 4 ч после начала кормления. Однако при количественной оценке в этих же группах мышей уровни экспрессии мРНК T1R3 в островках различались не существенно. Таким образом, изменение содержания T1R3 в островках мышей в зависимости от приема пищи происходит достаточно быстро и регулируется, возможно, за счет ускорения деградации белка T1R3. Учитывая данные, показывающие, что в бета-клетках T1R3 вовлечен в модуляцию метаболизма самой глюкозы (Nakagawa et al., 2014), было предположено, что скорость метаболизма глюкозы в зависимости от питания может регулироваться путем изменения содержания T1R3. Соответственно, у голодных мышей потребность в источнике энергии выше, чем у сытых мышей, поэтому у голодных мышей наблюдается более высокий уровень T1R3 для ускорения метаболизма глюкозы (Medina et al., 2014). Кроме того, уровень секреции инсулина, индуцированной глюкозой, в островках голодных мышей выше, чем в островках сытых мышей. Антагонист рецептора T1R3 гурмарин вызывал снижение вызванной глюкозой секреции инсулина в островках и голодных, и сытых мышей. В островках голодных мышей с высоким уровнем экс-

прессии T1R3 секреция инсулина снижалась более существенно, что можно объяснить модулирующим действием T1R3 на секрецию инсулина. Полученные результаты свидетельствуют о том, что глюкозозависимая секреция инсулина в бета-клетках зависит от условий питания и в ее регуляцию вовлечен T1R3. Соответственно, уровень экспрессии T1R3 колеблется в течение дня, повышаясь в состоянии натощак и понижаясь после приема пищи. Пониженный уровень экспрессии T1R3 также был обнаружен в островках мышшей и крыс с модельным сахарным диабетом и ожирением. Необходимо отметить, что у животных с модельным сахарным диабетом изменение экспрессии T1R3 происходит на уровне транскрипции, поскольку было установлено снижение уровней мРНК и белка. Снижение экспрессии T1R3 связано, очевидно, с гипергликемией, развивающейся у больных животных, поскольку введение инсулина в течение семи дней крысам с модельным сахарным диабетом приводило к устранению гипергликемии и восстановлению уровня экспрессии T1R3 (Medina et al., 2014). Эти данные согласуются с исследованиями (Kyriazis et al., 2014), в которых установлен пониженный уровень экспрессии генов *T1R2* и *T1R3* в островках поджелудочной железы мышшей, находящихся в условиях экспериментальной гипергликемии, и в островках поджелудочной железы мышшей с модельным сахарным диабетом или ожирением, у которых развивается состояние гипергликемии (Kyriazis et al., 2014).

Кроме рецепторов сладких соединений, в инсулин-синтезирующих клетках MIN6 обнаружен функциональный рецептор вкуса аминокислот, который представлен во вкусовых клетках гетеродимером T1R1/T1R3 (Oya et al., 2011). При помощи ОТ-ПЦР анализа в MIN6 были обнаружены мРНК транскрипты рецепторов T1R1 и T1R3, и экспрессия T1R1 на уровне белка подтверждена методом иммуноблоттинга. Иммуноцитохимический анализ показал, что белки T1R1 и T1R3 локализованы на цитоплазматической мембране и, следовательно, могут функционировать как поверхностные рецепторы аминокислот в клетках MIN6. В этой связи следует отметить, что аминокислоты L-глутамат, L-аргинин и L-лейцин вызывают в клетках MIN6 повышение внутриклеточного содержания IP3 и ионов Ca²⁺ дозозависимым образом, а также индуцируют глюкозозависимую секрецию инсулина (Oya et al., 2011). Инозинмонофосфат усиливал эффекты, вызываемые аминокислотами, указывая на участие T1R1 в детекции аминокислот в клетках MIN6. Антагонист рецептора T1R3 лактизол подавлял все эффекты, вызываемые аминокислотами в клетках MIN6. Эти данные дают основания предположить, что гете-

родимер T1R1/T1R3 выполняет роль рецептора аминокислот в инсулин-продуцирующих клетках и может участвовать в регуляции глюкозозависимой секреции инсулина (Oya et al., 2011). Интересными представляются результаты недавних исследований функциональной роли T1R3, выполненных с использованием нокаутных мышшей (Murovets et al., 2019), у которых наблюдалось уменьшение размера и плотности островков в поджелудочной железе. Кроме того, было выявлено снижение уровня экспрессии каспазы-3. Таким образом, нокаут гена, кодирующего T1R3, приводил к дистрофии ткани островков, сопровождаемой патологическими изменениями, которые ассоциируются с диабетом второго типа и ожирением у людей, что позволило авторам считать T1R3 перспективной терапевтической мишенью при создании препаратов для лечения патологий метаболизма (Murovets et al., 2019).

ЭКСПРЕССИЯ КОМПОНЕНТОВ ВКУСОВОЙ ТРАНСДУКЦИИ В БЕТА-КЛЕТКАХ

Кроме вкусовых рецепторов в бета-клетках исследовалась экспрессия специфического G-белка вкусового сигнального каскада гастдуцина. Полученные данные оказались противоречивыми. Например, экспрессия гастдуцина была выявлена в клетках инсулиномы MIN6 (Nakagawa et al., 2009; Oya et al., 2011) и в островках поджелудочной железы мышшей (Nakagawa et al., 2009) при помощи ОТ-ПЦР анализа. Накагава и соавт. предположили, что рецепторы семейства T1R в бета-клетках сопряжены с гастдуцином, поскольку антагонист рецептора сладкого гурмарин, блокирующий гастдуцинзависимый сигнальный путь во вкусовых клетках (Shigemura et al., 2008), подавлял Ca²⁺-ответ на сукралозу в клетках MIN6 (Nakagawa et al., 2009). Дальнейшие исследования показали, что Ca²⁺-ответ на искусственные подсластители ацесульфам калия и глицеризин в клетках MIN6 не блокируется гурмаринном (Nakagawa et al., 2013). При количественной оценке экспрессии различных G-белков в клетках MIN6 обнаружен крайне низкий уровень экспрессии гастдуцина по сравнению с G_s, G_i, G_o и G_{q/11}. Например, он составлял менее 0.01% относительно уровня экспрессии G_q. Нокдаун гастдуцина, полученный с использованием малых интерферирующих РНК, не оказывал влияния на Ca²⁺-ответы клеток MIN6 на сукралозу, ацесульфам калия и глицеризин. Поэтому в конечном итоге авторы пришли к заключению, что гастдуцин не участвует в сигнальных каскадах, индуцируемых подсластителями в клетках инсулиномы мышшей MIN6 (Nakagawa et al., 2013).

Недавно Удагава и соавт. (Udagawa et al., 2020) обнаружили мРНК гастдуцина в островках поджелудочной железы крыс и мышей, и в клеточных линиях INS-1 и MIN6. Экспрессия гастдуцина была подтверждена на уровне белка при помощи иммуноблот-анализа. В клетках INS-1 с нокдауном гастдуцина, вызванным применением малых интерферирующих РНК, наблюдалось повышение уровней цАМФ и Ca^{2+} по сравнению с контрольными клетками дикого типа. Кроме того, нокдаун гастдуцина приводил к повышению базальной секреции инсулина при низкой концентрации глюкозы (3 мМ). Однако при высоких концентрациях глюкозы (10 мМ и 25 мМ) уровень секреции инсулина не изменялся в клетках с нокдауном гастдуцина, по сравнению с диким типом. Нокдаун гастдуцина не влиял и на глюкозозависимую секрецию инсулина, индуцированную агонистом рецептора сладкого вкуса сукралозой. В итоге Удагава и соавт. пришли к выводу, что в бета-клетках гастдуцин не сопряжен с вкусовыми рецепторами, а вовлечен в модуляцию базальной секреции инсулина посредством увеличения уровней цАМФ и внутриклеточного кальция (Udagawa et al., 2020).

В островках поджелудочной железы мышей с модельным диабетом и мышей, питающихся кормом с высоким содержанием жиров, отмечено снижение уровня экспрессии гастдуцина по сравнению с островками поджелудочной железы контрольных групп животных. На основании этих данных было сделано предположение, что гастдуцин может быть вовлечен в патогенез сахарного диабета (Udagawa et al., 2020).

Во вкусовых клетках второго типа вкусовые рецепторы сопряжены с классическим фосфоинозитидным каскадом, ключевым эффектором которого является фосфолипаза PLC β 2. Представители подгруппы β семейства фосфолипаз PLC активируются G-белками. PLC β 2 обнаружена при помощи иммуноблот-анализа в островках поджелудочной железы крыс и в клеточных линиях инсулином INS-1 и β G40/110 (Gasa et al., 1999). Экспрессия транскриптов мРНК PLC β 2 детектирована в клеточной линии инсулиномы мышей MIN6 и в островках поджелудочной железы мышей с применением метода ОТ-ПЦР в реальном времени (Kyriazis et al., 2012). Однако необходимо отметить, что данные относительно экспрессии PLC β 2 противоречивы, поскольку в ряде работ экспрессия PLC β 2 не была обнаружена в клетках MIN6, в островках поджелудочной железы мышей и крыс (Kim et al., 2001a; 2001b; Fiume et al., 2012; Hwang et al., 2019). Тем не менее данные функциональных исследований свидетельствуют о том, что какая-то фосфолипаза из группы PLC вовлечена в сигнальные каскады в бета-клетках

поджелудочной железы. Например, было обнаружено, что антагонист IP3-рецепторов 2-APB блокирует Ca^{2+} -ответ и снижает цАМФ-ответ на сукралозу в клетках MIN6 (Nakagawa et al., 2009). Это свидетельствует об активации PLC, поскольку мишенью вторичного посредника IP3, продуцируемого PLC, являются IP3-рецепторы. Ингибитор PLC U73122 значительно снижал Ca^{2+} -ответы на подсластители в клетках MIN6 и в бета-клетках островков поджелудочной железы мышей, в то время как его неактивный аналог U73343 не оказывал влияния на эти ответы (Kyriazis et al., 2012; Nakagawa et al., 2013). Ингибирование PLC также приводило к снижению глюкозозависимой секреции инсулина, индуцированной фруктозой, в клетках островков Лангерганса мышей (Kyriazis et al., 2012). Эти данные дают основания полагать, что фосфолипазы PLC вовлечены в сигнальные каскады в бета-клетках.

Экспрессия рецептора IP3R3, который является компонентом вкусового сигнального каскада, обнаружена на уровне мРНК и белка в островках поджелудочной железы крыс и мышей, а также в культурах инсулином крыс, мышей и хомяков (RINm5, INS-1, β HC9, HIT-T15) (Blondel et al., 1993; 1994; Swatton et al., 1999; Rosker et al., 2009; Li, Zhang, 2009; Lee et al., 1998; Lee, Laychock, 2001). Транскрипты IP3R3 были выявлены при анализе данных RNA-seq бета-клеток поджелудочной железы человека (Nordenskjöld et al., 2020). Культивирование клеток инсулином крыс RINm5F и мышей β HC9 в условиях высокой концентрации глюкозы (25 мМ) вызывало в них повышение уровня экспрессии IP3R3 (Blondel et al., 1994; Lee et al., 1998). Также повышение уровня IP3R3 наблюдалось у крыс при развитии гипергликемии. Учитывая, что глюкоза является основным индуктором секреции инсулина, авторы высказали предположение, что IP3R3 участвует в регуляции секреции инсулина, обеспечивая мобилизацию внутриклеточного кальция (Blondel et al., 1994).

Компонент вкусового сигнального каскада катионный канал TRPM5 обнаружен при помощи ОТ-ПЦР анализа в островках поджелудочной железы мышей и человека, в культуральных клетках инсулином мышей MIN6 и крыс INS-1 (Prawitt et al., 2003; Colsooul et al., 2010; Kyriazis et al., 2012). В одной из работ экспрессию мРНК TRPM5 в MIN6 не удалось обнаружить (Nakagawa et al., 2009). На уровне белка колокализация TRPM5 и инсулина была выявлена на срезах островков поджелудочной железы мышей с использованием флуоресцентной иммуногистохимии (Colsooul et al., 2010). Результаты сравнительного анализа ионных токов в одиночных клетках, выделенных из островков мышей дикого типа и с нокаутом гена

TRPM5, показали, что *TRPM5* является важным компонентом кальций-активированных катионных токов в бета-клетках. *TRPM5* определяет частоту кальциевых осцилляций, индуцированных глюкозой в бета-клетках. У мышей с нокаутом *TRPM5* были обнаружены изменения в толерантности к глюкозе и снижении уровня глюкозозависимой секреции инсулина бета-клетками (Colsoul et al., 2010). Эти данные позволили выдвинуть гипотезу об участии *TRPM5* в регуляции секреции инсулина (Brixel et al., 2010; Colsoul et al., 2010). Натуральные подсластители стевииолосые гликозиды обладают способностью потенцировать активность канала *TRPM5*. Было показано, что они также увеличивают секрецию инсулина, индуцированную глюкозой, в островках мышей дикого типа, но не в островках животных с нокаутированным геном *TRPM5*. Ежедневное добавление в пищу мышей стевииолосых гликозидов препятствовало развитию у них диабетической гипергликемии, вызванной высококалорийной диетой. Однако у мышей с нокаутом *TRPM5* этот эффект не наблюдался. Полученные результаты позволили авторам рассматривать *TRPM5* как перспективную фармакологическую мишень для предотвращения и лечения диабета второго типа (Philippaert et al., 2017).

В островках поджелудочной железы мышей с модельным диабетом (гаплотипы *db/db* и *ob/ob*) наблюдалось снижение уровня экспрессии транскриптов *TRPM5* по сравнению с контрольными животными. Мыши с модельным диабетом характеризуются дефицитом лептина (*ob/ob*) или дефицитом рецептора лептина (*db/db*), вследствие чего у них развиваются ожирение, гиперинсулинемия и гипергликемия. При изучении эффектов каждого из этих факторов было установлено, что снижение экспрессии *TRPM5* в островках поджелудочной железы таких мышей связано с повышенным уровнем инсулина. Таким образом, инсулинозависимое подавление экспрессии *TRPM5* является компенсаторным механизмом для предотвращения чрезмерной секреции инсулина при развитии сахарного диабета (Colsoul et al., 2014).

За рецепцию вкуса ненасыщенных жирных кислот во вкусовых клетках второго типа отвечают транслокатор *CD36* и рецепторы *GPR40* и *GPR120*. Свободные жирные кислоты играют важную роль в физиологии бета-клеток поджелудочной железы. При нормальных физиологических условиях они поддерживают базальный уровень секреции инсулина при голодании и резко потенцируют секрецию в присутствии глюкозы. Однако повышение концентрации жирных кислот в течение длительного времени имеет негативное влияние на бета-клетки. Этот феномен

назван липотоксичностью. Повышение уровня свободных жирных кислот в кровотоке крыс с ожирением приводило к функциональным нарушениям в бета-клетках, их апоптозу и развитию диабета. Экспрессия транслокатора жирных кислот *CD36* обнаружена в островках поджелудочной железы человека и в клеточных линиях *MIN6* и *INS-1* при помощи ОТ-ПЦР анализа, иммуноблот-анализа и иммуногистохимии (Noushmehr et al., 2005; Wallin et al., 2010). Обработка клеток *MIN6* специфическим ингибитором *CD36* приводила к подавлению в них транслокации жирных кислот. В настоящее время считается, что *CD36* играет важную роль в модуляции физиологического состояния островков, регулируя утилизацию жирных кислот бета-клетками и секрецию инсулина (Noushmehr et al., 2005).

Экспрессия рецептора *GPR40* выявлена при помощи ОТ-ПЦР анализа, РНК-гибридизации *in situ*, иммуногистохимии и иммуноблот-анализа в клеточных линиях инсулиномы мышей *MIN6* и β ТС-3, инсулиномы крыс *RINm5F* и инсулиномы хомяка *HIT-T15*, а также в островках крыс, мышей и человека (Itoh et al., 2003; Kotarsky et al., 2003; Salehi et al., 2005; Steneberg et al., 2005; Tomita et al., 2006; Schnell et al., 2007; Del Guerra et al., 2010). Экспрессия *GPR120* также была обнаружена в островках крыс и мышей и в клеточных линиях *INS-1E* и *MIN6*, используя ОТ-ПЦР анализ, иммуногистохимию и иммуноблоттинг (Kebede et al., 2009; Moran et al., 2014; Zhang et al., 2017). В островках поджелудочной железы человека транскрипты *GPR120* были обнаружены при экспрессионном анализе на основе кДНК-микрочипов (Taneera et al., 2012). Свободные жирные кислоты вызывают повышение внутриклеточного содержания ионов Ca^{2+} и усиливают глюкозозависимую секрецию инсулина в бета-клетках грызунов, а нокаут *GPR40* и *GPR120* или подавление их экспрессии блокируют эти эффекты. Таким образом, влияние жирных кислот на уровень внутриклеточного кальция и на секрецию инсулина опосредовано через рецепторы *GPR40* и *GPR120* (Itoh et al., 2003; Fujiwara et al., 2005; Salehi et al., 2005; Shapiro et al., 2005; Steneberg et al., 2005; Schnell et al., 2007; Zhang et al., 2017). Для подтверждения роли *GPR40* и *GPR120* в регуляции секреции инсулина применялись низкомолекулярные агонисты и антагонисты рецепторов жирных кислот, что позволило исключить эффекты, связанные с метаболизмом жирных кислот. Усиление глюкозозависимой секреции в клетках *MIN6*, индуцированное агонистом *GPR40*-рецептора *GW9508*, полностью ингибировалось селективным антагонистом *GW1100* (Briscoe et al., 2006). Селективный агонист *GPR120*-рецептора *GSK137647* вызывал усиление глюкозозависимой

секреции инсулина в островках поджелудочной железы крыс и мышей и в культуральных клетках INS-1E. Этот инсулинотропный эффект блокировался селективным антагонистом GPR120-рецептора AN7614 (Zhang et al., 2017). Приведенные данные ингибиторного анализа указывают на то, что рецепторы GPR40 и GPR120 вовлечены в регуляцию глюкозозависимой секреции инсулина в бета-клетках.

ЭКСПРЕССИЯ КОМПОНЕНТОВ ОБОНЯТЕЛЬНОЙ ТРАНСДУКЦИИ В БЕТА-КЛЕТКАХ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Обонятельная система млекопитающих осуществляет детекцию запахов и феромонов с исключительной чувствительностью и специфичностью, и определяет широкий спектр физиологических функций, включая размножение, социальное поведение, поиск и выбор пищи, а также регуляцию нейроэндокринных функций. Трансдукция обонятельного сигнала происходит в обонятельных цилиях сенсорных нейронов обонятельного эпителия. В процессе обонятельной трансдукции происходит преобразование внешнего химического стимула во внутриклеточный электрохимический сигнал. Распознавание запахов обеспечивается обонятельными рецепторами, принадлежащими к семейству GPCR-рецепторов. Гены обонятельных рецепторов, составляющие самое большое мультигенное семейство в геномах млекопитающих, впервые были идентифицированы в 1991 г. в обонятельном эпителии крысы при помощи молекулярного клонирования (Vuck, Axel, 1991). Связывание молекул пахучих веществ с обонятельным рецептором запускает классический цАМФ-опосредованный сигнальный путь. Активированный рецептор передает сигнал на специфический обонятельный G-белок G_{olf} , что приводит к индукции аденилатциклазы III (ACIII), которая катализирует превращение АТФ в цАМФ (Wong et al., 2000). Повышение концентрации вторичного посредника цАМФ инициирует открытие Ca^{2+} -проницаемых CNG-каналов и деполяризацию мембраны обонятельного нейрона. Происходящее при этом повышение внутриклеточного содержания ионов кальция вызывает активацию кальций-управляемых хлорных каналов и выход ионов хлора из клетки, что обуславливает дополнительную деполяризацию клеточной мембраны и возникновение потенциала действия.

В настоящее время накоплены данные, свидетельствующие о том, что ключевые элементы передачи обонятельных сигналов имеют ectopic экспрессию в инсулинпродуцирующих

клетках. В 1998 г. Блаш и соавт. клонировали мРНК неизвестного на момент исследования обонятельного рецептора OL2 в клетках инсулиномы мышей MIN6 (Blache et al., 1998). Мунаката и соавт. идентифицировали около 47 обонятельных рецепторов в островках поджелудочной железы мышей и в клетках MIN6 при экспрессионном анализе при помощи кДНК-микрочипов. Экспрессию трех из них (Olf15, Olf821 и Olf1222) они подтвердили методом ОТ-ПЦР в клетках MIN6. Иммуногистохимический анализ выявил локализацию OLF15 и OLF821 в бета-клетках поджелудочной железы мышей (Munakata et al., 2018). Лим и соавт. при экспрессионном анализе на основе кДНК-микрочипов идентифицировали 29 обонятельных рецепторов в клетках инсулиномы мышей MIN6. Кроме того, они подтвердили экспрессию Olf15 в бета-клетках поджелудочной железы мышей и в клетках MIN6 методами ОТ-ПЦР, иммуноблот-анализа и иммуногистохимии (Leem et al., 2018). Агонист рецептора OLF15 – октановая кислота вызывала усиление глюкозозависимой секреции инсулина в островках поджелудочной железы мышей и в клетках MIN6. Подавление экспрессии Olf15 посредством мРНК отменяло эффекты октановой кислоты на глюкозозависимую секрецию инсулина в клетках MIN6, подтверждая функциональный характер экспрессии OLF15 (Leem et al., 2018; Munakata et al., 2018). В островках поджелудочной железы мышей с модельным сахарным диабетом снижена экспрессия OLF15 и глюкозозависимая секреция инсулина, индуцируемая октановой кислотой, по сравнению с контрольными животными, что может свидетельствовать о возможной роли обонятельных рецепторов в патогенезе сахарного диабета (Leem et al., 2018).

Экспрессия специфической обонятельной субъединицы G-белка G_{olf} обнаружена при помощи ОТ-ПЦР анализа, РНК-гибридизации *in situ*, иммуноблот-анализа и иммуногистохимии в бета-клетках островков поджелудочной железы грызунов и человека, а также в клеточных линиях β ТС-1, β ТС-3, HIT-T15 и RINm5F (Zigman et al., 1993; Marie et al., 1996; Emami et al., 1998; Frayon et al., 1999; Astesano et al., 1999; Skoglund et al., 1999; Phan et al., 2000; Portela-Gomes, Abdel-Halim, 2002). G_{olf} обнаружен также в инсулиновых секреторных гранулах бета-клеток поджелудочной железы крыс с применением иммуноцитохимии, что может свидетельствовать о его вовлечении в процесс экзоцитоза инсулина (Astesano et al., 1999). Сверхэкспрессия G_{olf} в клетках инсулиномы β ТС-3 вызывала снижение глюкозозависимой секреции инсулина, что также позволяет сделать вывод об участии G_{olf} в регуляции секреции инсулина (Régnauld et al., 2002). Фан и соавт. (Phan et al.,

2000) показали, что в бета-клетках поджелудочной железы крыс и в клетках инсулиномы хомьяков Н1Т-Т15 $G_{\alpha_{olf}}$, локализованный в субклеточных фракциях М1 (содержащих клеточные мембраны, цитоплазматические органеллы, инсулиновые гранулы) и М2 (содержащих митохондрии), подвергается АДФ-рибозилированию под воздействием холерного токсина. На основании этих данных авторы сделали предположение о функциональном характере экспрессии $G_{\alpha_{olf}}$ в бета-клетках и его потенциальной способности активировать аденилатциклазу в инсулин-содержащих клетках. При длительном культивировании в течение двух недель клеток Н1Т-Т15 в условиях высокой концентрации глюкозы (25 мМ) в субклеточной фракции М1 наблюдались повышение экспрессии $G_{\alpha_{olf}}$ и снижение уровня АДФ-рибозилирования $G_{\alpha_{olf}}$, что может свидетельствовать о снижении его функциональной активности. Такие же изменения наблюдались в островках поджелудочной железы сытых мышей по сравнению с островками поджелудочной железы голодных мышей. Авторы пришли к заключению, что гипергликемия модулирует экспрессию и функциональную активность $G_{\alpha_{olf}}$ и может оказывать негативное влияние на цАМФ-зависимый процесс секреции инсулина при развитии сахарного диабета (Phan et al., 2000). Это предположение согласуется с тем, что в бета-клетках поджелудочной железы крыс с модельным сахарным диабетом повышена экспрессия $G_{\alpha_{olf}}$ по сравнению с контрольными животными (Frayon et al., 1999; Portela-Gomes, Abdel-Halim, 2002). Кроме того, имеются данные, показывающие, что $G_{\alpha_{olf}}$ может играть роль в регуляции морфогенеза поджелудочной железы и процессов роста, дифференцировки и апоптоза бета-клеток (Ferrand et al., 1996; Régnault et al., 2002).

Экспрессия ключевого компонента обонятельной трансдукции АСIII обнаружена в бета-клетках поджелудочной железы крыс с применением методов иммуногистохимии и РНК-гибридизации *in situ* (Abdel-Halim et al., 1998; Guenifi et al., 2000; Portela-Gomes, Abdel-Halim, 2002). Выявленная коэкспрессия $G_{\alpha_{olf}}$ и АСIII в бета-клетках островков крыс позволяет предположить, что они могут являться компонентами какого-то неизвестного сигнального каскада (Emami et al., 1998; Portela-Gomes, Abdel-Halim, 2002). Повышение экспрессии АСIII в бета-клетках поджелудочной железы крыс с модельным сахарным диабетом может быть связано с мутациями, обнаруженными в промоторной области гена АСIII (Abdel-Halim et al., 1998). На основании данных о повышенном уровне экспрессии АСIII в островках поджелудочной железы крыс с модельным сахарным диабетом было выдвинуто предположе-

ние о возможном участии этого сигнального белка в формировании диабетического фенотипа (Abdel-Halim et al., 1998; Guenifi et al., 2000; Portela-Gomes, Abdel-Halim, 2002; Seed Ahmed et al., 2012).

ЭКСПРЕССИЯ КОМПОНЕНТОВ КАСКАДОВ ФОТОТРАНСДУКЦИИ В БЕТА-КЛЕТКАХ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Процесс фототрансдукции происходит в фоторецепторных клетках сетчатки глаза – палочках и колбочках. Палочки детектируют зрительные стимулы при низкой интенсивности света и обеспечивают ночное зрение, а колбочки осуществляют детекцию зрительных стимулов высокой интенсивности, обеспечивают дневное зрение и позволяют различать цвета. В отличие от большинства сенсорных рецепторных клеток палочки и колбочки гиперполяризуются при фотостимуляции и деполяризованы в темноте. В этих фоточувствительных клетках молекулярным сенсором фотонов является родопсин, который принадлежит к суперсемейству семидоменных рецепторов, сопряженных с G-белками. Родопсин, открытый Боллем (Boll, 1977), состоит из белковой части опсина и хромофора ретинальдегида. При поглощении кванта света хромофорная группа 11-цис-ретиналь изомеризуется в трансформу, вызывая конформационное изменение белковой части рецептора, которое инициирует сигнальные процессы, называемые фототрансдукцией (Kwok-Keung Fung, Stryer, 1980; Godchaux, Zimmerman, 1979). Гетеротримерные G-белки в палочках и колбочках имеют различный состав. В палочках локализованы субъединицы α_1 (трансдуцин палочек), β_1 и γ_1 , а в колбочках α_2 (трансдуцин колбочек), β_3 и γ_8 . Эффекторным белком в каскаде фототрансдукции является фосфодиэстераза 6 (PDE6), которая неактивна в темноте за счет взаимодействия каталитических и ингибиторных субъединиц. Активированный трансдуцин стимулирует PDE6, которая конвертирует циклический ГМФ (цГМФ) в ГМФ. Снижение концентрации внутриклеточного цГМФ приводит к закрытию цГМФ-активируемых ионных каналов (CNG-каналы) и гиперполяризации фоторецепторной клетки (Fesenko et al., 1986; Yau, Hardie, 2009). В палочках и колбочках процесс фототрансдукции происходит идентично, вовлекая при этом разные изоформы ключевых белков зрительного сигнального каскада, включая трансдуцин, фосфодиэстеразу и CNG-каналы (Yau, Hardie, 2009). Кроме палочек и колбочек, в сетчатке глаза есть третий тип фоточувствительных клеток – ганглионарные клетки, связанные с циркадными ритмами. Эти клетки экспрессируют фоторецепторный белок меланопсин, сопряженный не с

трансдукцином, а с G-белком Gq. Фотоактивация меланопсина запускает неканонический каскад фототрансдукции, компонентами которого являются фосфолипаза PLC β 4 и каналы TRPC6 и TRPC7 (Xue et al., 2011). Существуют данные о локализации опсинов в органах, не относящихся к зрительной системе, например, в головном мозге, коже, кровеносных сосудах, иммунных клетках, печени, легких, семенниках и аорте, но функция их в этих органах пока не известна (Leung, Montell, 2017). Информации об экспрессии опсинов в бета-клетках на сегодняшний день нет, тем не менее, некоторые компоненты каскада фототрансдукции в них обнаружены. Так, при помощи флуоресцентной иммуногистохимии в бета-клетках поджелудочной железы крысы выявлена экспрессия трансдукцина колбочек (Skoglund et al., 1999). В островках поджелудочной железы мышей экспрессия трансдукцина колбочек была обнаружена методами ОТ-ПЦР, Нозерн-блота и РНК-гибридизации *in situ* (Zigman et al., 1994). Наряду с поджелудочной железой трансдукцин колбочек также был обнаружен в надпочечниках и гипофизе, и это позволило авторам предположить, что трансдукцин может выступать модулятором секреции гормонов (Zigman et al., 1994). По поводу экспрессии трансдукцина палочек в бета-клетках информации на сегодняшний день нет. Из других элементов фототрансдукции Кассар и соавт. (Cassar et al., 2004) при помощи ОТ-ПЦР выявили экспрессию CNGA3, которая является субъединицей CNG-каналов колбочек млекопитающих, в 23 тканях человека, включая поджелудочную железу. Идентификация трех альтернативных сплайс-вариантов мРНК CNGA3, для которых характерна тканеспецифическая экспрессия, позволили предположить, что функциональная роль сплайс-вариантов CNGA3 различна в разных тканях (Cassar et al., 2004). В клеточной линии инсулиномы крыс INS-1 при помощи ОТ-ПЦР выявлена экспрессия субъединиц CNGA1, CNGA2, CNGB1 и CNGB3, что указывает на возможность существования в бета-клетках функциональных гетеромерных CNG-каналов, которые предположительно вовлечены в кальциевую сигнализацию, регулирующую секрецию инсулина (Stumpf et al., 2008). В бета-клетках поджелудочной железы также присутствуют некоторые компоненты неканонического каскада фототрансдукции, сопряженного с меланопсином. Так, применение методов иммуногистохимии, иммуноблот-анализа и ОТ-ПЦР в реальном времени позволило обнаружить экспрессию PLC β 4 в островках поджелудочной железы мышей и крыс и в клеточной линии инсулиномы мышей MIN6 (Kim et al., 2001a; 2001b; Hwang et al., 2019). С применением ОТ-ПЦР экспрессия транскриптов TRPC7 выяв-

лена в островках поджелудочной железы человека (Qian et al., 2002), а экспрессия TRPC6 в островках поджелудочной железы крыс (Hayes et al., 2013).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бета-клетках островков Лангерганса поджелудочной железы млекопитающих обнаружена экспрессия компонентов сигнальных каскадов, вовлеченных во вкусовую, обонятельную и фототрансдукцию. Относительно экспрессии некоторых компонентов данные в опубликованных статьях противоречивы. Возможно, это связано с тем, что уровень эктопической экспрессии исследуемых молекул невысок по сравнению с уровнем их специфической экспрессии в специализированных клетках вкусовой, обонятельной и зрительной систем. Кроме того, нужно отметить, что не все компоненты специфических сигнальных каскадов сенсорных клеток представлены в бета-клетках. В бета-клетках и культуральных клетках различных линий инсулином выявлена экспрессия генов вкусовых рецепторов семейства T1R, густуцина, фосфолипазы PLC, рецептора IP3R3, катионного канала TRPM5. Обнаружена экспрессия сигнальных элементов обонятельной сенсорной системы: генов обонятельных рецепторов, специфической обонятельной α -субъединицы G-белков G $_{\alpha olf}$ и обонятельной изоформы аденилатциклазы ACIII. Показана экспрессия в клетках островков поджелудочной железы компонентов канонического и неканонического сигнальных каскадов фототрансдукции: трансдукцина колбочек сетчатки глаза, катионных каналов, активируемых циклическими нуклеотидами, фосфолипазы PLC β 4, каналов TRPC6 и TRPC7. В ходе физиологических исследований подтверждена функциональная активность выявленных сигнальных белков в бета-клетках островков Лангерганса, а именно их участие в регуляции базовой и глюкозозависимой секреции инсулина. При исследовании животных с модельным сахарным диабетом отмечено, что их экспрессия и функция в бета-клетках поджелудочной железы изменяются при развитии заболевания. Результаты функциональных исследований компонентов сигнальных каскадов сенсорной трансдукции в бета-клетках указывают на их возможную роль в патогенезе сахарного диабета. В настоящее время некоторые из описанных в данном обзоре сигнальных молекул рассматриваются как перспективные фармакологические мишени для разработки новых подходов к терапии этого заболевания.

The expression and function of components of signaling cascades of taste, olfactory, and phototransduction in mammalian pancreas beta-cells

Yu. A. Kovalitskaya^a, N. P. Kovalenko^a, and M. F. Bystrova^{a, #}

^a Institute of Cell Biophysics, Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences
142290 Moscow Region, Pushchino, Institutskaya street, 3, Russia

[#]E-mail: marinabystrova@rambler.ru

The taste, olfactory, and visual systems are responsible for the detection and recognition of diverse physical and chemical stimuli of environment. Proteins involved in sensory transduction pathways are expressed in highly specific manner in taste cells, olfactory neurons, retinal cones and rods. However, the ectopic expression of the components of the transduction cascades mediating sensory reception were also found in beta-cells of mammalian pancreatic islets that synthesize, store, and release the hormone insulin. The functional role of the proteins involved in sensory transduction in the physiology of beta-cells remains unclear. A growing body of evidence indicates that in beta-cells, they may participate in the regulation of glucose stimulated insulin release and insulin production. Here, we provide a review of what is known about ectopic expression of the components of the transduction cascades of sensory reception in pancreas beta-cells as well as in the insulinoma cell lines, which retain glucose stimulated insulin secretion as isolated islets.

Key words: beta-cells, islets of Langerhans, insulin secretion, ectopic expression, signaling cascade, olfactory transduction, taste transduction, phototransduction

REFERENCES

- Abdel-Halim S.M., Guenifi A., He B., Yang B., Mustafa M., Höjberg B., Hillert J., Bakhiet M., Efendić S. Mutations in the promoter of adenylyl cyclase (AC)-III gene, overexpression of AC-III mRNA, and enhanced cAMP generation in islets from the spontaneously diabetic GK rat model of type 2 diabetes. *Diabetes*. 1998. V. 47 (3). P. 498–504.
<https://doi.org/10.2337/diabetes.47.3.498>
- Adler E., Hoon M.A., Mueller K.L., Chandrashekar J., Ryba N.J., Zuker C.S. A novel family of mammalian taste receptors. *Cell*. 2000. V. 100 (6). P. 693–702.
[https://doi.org/10.1016/s0092-8674\(00\)80705-9](https://doi.org/10.1016/s0092-8674(00)80705-9)
- Astesano A., Regnaud K., Ferrand N., Gingras D., Bendayan M., Rosselin G., Emami S. Cellular and subcellular expression of Golf/Gs and Gq/G11 alpha-subunits in rat pancreatic endocrine cells. *Journal of histochemistry and cytochemistry*. 1999. V. 47 (3). P. 289–302.
<https://doi.org/10.1177/002215549904700303>
- Blache P., Gros L., Salazar G., Bataille D. Cloning and tissue distribution of a new rat olfactory receptor-like (OL2). *Biochemical and biophysical research communications*. 1998. V. 242 (3). P. 669–672.
<https://doi.org/10.1006/bbrc.1997.8041>
- Blondel O., Moody M.M., Depaoli A.M., Sharp A.H., Ross C.A., Swift H., Bell G.I. Localization of inositol trisphosphate receptor subtype 3 to insulin and somatostatin secretory granules and regulation of expression in islets and insulinoma cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1994. V. 91 (16). P. 7777–7781.
<https://doi.org/10.1073/pnas.91.16.7777>
- Blondel O., Takeda J., Janssen H., Seino S., Bell G.I. Sequence and functional characterization of a third inositol trisphosphate receptor subtype, IP3R-3, expressed in pancreatic islets, kidney, gastrointestinal tract, and other tissues. *Journal of Biological Chemistry*. 1993. V. 268 (15). P. 11356–11363.
- Boll F. On the anatomy and physiology of the retina. *Vision Research*. 1977. V. 17 (11–12). P. 1249–1265.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(77\)90112-2](https://doi.org/10.1016/0042-6989(77)90112-2)
- Briscoe C.P., Peat A.J., McKeown S.C., Corbett D.F., Goetz A.S., Littleton T.R., McCoy D.C., Kenakin T.P., Andrews J.L., Ammala C., Fornwald J.A., Ignar D.M., Jenkinson S. Pharmacological regulation of insulin secretion in MIN6 cells through the fatty acid receptor GPR40: identification of agonist and antagonist small molecules. *British Journal of Pharmacology*. 2006. V. 148 (5). P. 619–628.
<https://doi.org/10.1038/sj.bjp.0706770>
- Brixel L.R., Monteilh-Zoller M.K., Ingenbrandt C.S., Fleig A., Penner R., Enklaar T., Zabel B.U., Prawitt D. TRPM5 regulates glucose-stimulated insulin secretion. *Pflugers Archiv : European journal of physiology*. 2010. V. 460 (1). P. 69–76.
<https://doi.org/10.1007/s00424-010-0835-z>
- Bruce J.I., Yang X., Ferguson C.J., Elliott A.C., Steward M.C., Case R.M., Riccardi D. Molecular and functional identification of a Ca²⁺ (polyvalent cation)-sensing receptor in rat pancreas. *Journal of Biological Chemistry*. 1999. V. 274 (29). P. 20561–20568.
<https://doi.org/10.1074/jbc.274.29.20561>
- Buck L., Axel R. A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition. *Cell*. 1991. V. 65 (1). P. 175–187.
[https://doi.org/10.1016/0092-8674\(91\)90418-x](https://doi.org/10.1016/0092-8674(91)90418-x)
- Caicedo A., Pereira E., Margolskee R.F., Roper S.D. Role of the G-protein subunit alpha-gustducin in taste cell responses to bitter stimuli. *The Journal of Neuroscience*. 2003. V. 23 (30). P. 9947–9952.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-30-09947.2003>

- Cassar S.C., Chen J., Zhang D., Gopalakrishnan M. Tissue specific expression of alternative splice forms of human cyclic nucleotide gated channel subunit CNGA3. *Molecular Vision*. 2004. V. 10. P. 808–813.
- Colsoul B., Jacobs G., Philippaert K., Owsianik G., Segal A., Nilius B., Voets T., Schuit F., Vennekens R. Insulin downregulates the expression of the Ca²⁺-activated nonselective cation channel TRPM5 in pancreatic islets from leptin-deficient mouse models. *Pflugers Archiv : European journal of physiology*. 2014. V. 466 (3). P. 611–621.
https://doi.org/10.1007/s00424-013-1389-7
- Colsoul B., Schraenen A., Lemaire K., Quintens R., Van Lommel L., Segal A., Owsianik G., Talavera K., Voets T., Margolskee R.F., Kokrashvili Z., Gilon P., Nilius B., Schuit F.C., Vennekens R. Loss of high-frequency glucose-induced Ca²⁺ oscillations in pancreatic islets correlates with impaired glucose tolerance in *Trpm5*^{-/-} mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2010. V. 107 (11). P. 5208–5213.
https://doi.org/10.1073/pnas.0913107107
- Da Silva Xavier G. The Cells of the Islets of Langerhans. *Journal of Clinical Medicine*. 2018. V. 7 (3). P. 54–59.
https://doi.org/10.3390/jcm7030054
- Del Guerra S., Bugliani M., D'Aleo V., Del Prato S., Boggi U., Mosca F., Filippini F., Lupi R. G-protein-coupled receptor 40 (GPR40) expression and its regulation in human pancreatic islets: the role of type 2 diabetes and fatty acids. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*. 2010. V. 20 (1). P. 22–25.
https://doi.org/10.1016/j.numecd.2009.02.008
- Dolenšek J., Rupnik M. S., Stožer A. Structural similarities and differences between the human and the mouse pancreas. *Islets*. 2015. V. № 1.7. P. e1024405 (1–16).
https://doi.org/10.1080/19382014.2015.1024405
- Elyat A.A., el-Naggar M.M., Tahir M. An immunocytochemical and morphometric study of the rat pancreatic islets. *Journal of Anatomy*. 1995. V. 186. P. 629–637.
- Emami S., Regnaud K., Ferrand N., Astesano A., Pessah M., Phan H., Boissard C., Garel J.M., Rosselin G. Stimulatory transducing systems in pancreatic islet cells. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1998. V. 865. P. 118–131.
https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1998.tb11170.x
- Ferrand N., Astesano A., Rosselin G. Evidence of G-protein alpha s and alpha olf subunits in developing human pancreas. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1996. V. 805 (1). P. 563–569.
https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1996.tb17520.x
- Fesenko E.E., Kolesnikov S.S., Lyubarsky A.L. Direct action of cGMP on the conductance of retinal rod plasma membrane. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. 1986. V. 856 (3). P. 661–671.
https://doi.org/10.1016/0005-2736(86)90162-8
- Fiume R., Ramazzotti G., Faenza I., Piazzini M., Bavelloni A., Billi A.M., Cocco L. Nuclear PLCs affect insulin secretion by targeting PPARγ in pancreatic β cells. *FASEB Journal*. 2012. V. 26 (1). P. 203–210.
https://doi.org/10.1096/fj.11-186510
- Frayon S., Pessah M., Giroix M.H., Mercan D., Boissard C., Malaisse W.J., Portha B., Garel J.M. Galphao1 identification by RT-PCR in purified normal pancreatic B cells and in islets from rat models of non-insulin-dependent diabetes. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 1999. V. 254 (1). P. 269–272.
https://doi.org/10.1006/bbrc.1998.9791
- Fujiwara K., Maekawa F., Yada T. Oleic acid interacts with GPR40 to induce Ca²⁺ signaling in rat islet beta-cells: mediation by PLC and L-type Ca²⁺ channel and link to insulin release. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*. 2005. V. 289 (4). P. E670–E677.
https://doi.org/10.1152/ajpendo.00035.2005
- Gasa R., Trinh K.Y., Yu K., Wilkie T.M., Newgard C.B. Overexpression of G11alpha and isoforms of phospholipase C in islet beta-cells reveals a lack of correlation between inositol phosphate accumulation and insulin secretion. *Diabetes*. 1999. V. 48. № 5. P. 1035–1044.
https://doi.org/10.2337/diabetes.48.5.1035
- Godchaux W. 3rd, Zimmerman W.F. Membrane-dependent guanine nucleotide binding and GTPase activities of soluble protein from bovine rod cell outer segments. *The Journal of Biological Chemistry*. 1979. V. 254 (16). P. 7874–7884.
- Guenifi A., Portela-Gomes G.M., Grimelius L., Efenđić S., Abdel-Halim S.M. Adenylyl cyclase isoform expression in non-diabetic and diabetic Goto-Kakizaki (GK) rat pancreas. Evidence for distinct overexpression of type-8 adenylyl cyclase in diabetic GK rat islets. *Histochemistry and Cell Biology*. 2000. V. 113 (2). P. 81–89.
https://doi.org/10.1007/s004180050010
- Hayes H.L., Moss L.G., Schisler J.C., Haldeman J.M., Zhang Z., Rosenberg P.B., Newgard C.B., Hohmeier H.E. Pdx-1 activates islet α- and β-cell proliferation via a mechanism regulated by transient receptor potential cation channels 3 and 6 and extracellular signal-regulated kinases 1 and 2. *Molecular and Cellular Biology*. 2013. V. 33 (20). P. 4017–4029.
https://doi.org/10.1128/MCB.00469-13
- Hwang H.J., Yang Y.R., Kim H.Y., Choi Y., Park K.S., Lee H., Ma J.S., Yamamoto M., Kim J., Chae Y.C., Choi J.H., Cocco L., Berggren P.O., Jang H.J., Suh P.G. Phospholipase C-β1 potentiates glucose-stimulated insulin secretion. *FASEB Journal*. 2019. V. 33 (10). P. 10668–10679.
https://doi.org/10.1096/fj.201802732RR
- Ichimura A., Hasegawa S., Kasubuchi M., Kimura I. Free fatty acid receptors as therapeutic targets for the treatment of diabetes. *Frontiers in Pharmacology*. 2014. V. 5. P. 236.
https://doi.org/10.3389/fphar.2014.00236
- Ishihara H., Asano T., Tsukuda K., Katagiri H., Inukai K., Anai M., Kikuchi M., Yazaki Y., Miyazaki J.I., Oka Y. Pancreatic beta cell line MIN6 exhibits characteristics of glucose metabolism and glucose-stimulated insulin secretion similar to those of normal islets. *Diabetologia*.

1993. V. 36 (11). P. 1139–1145.
<https://doi.org/10.1007/BF00401058>
- Itoh Y., Kawamata Yu., Harada M., Kobayashi M., Fujii R., Fukusumi Sh., Ogi K., Hosoya M., Tanaka Y., Uejima H., Tanaka H., Maruyama M., Satoh R., Okubo Sh., Kizawa H., Komatsu H., Matsumura F., Noguchi Yu., Shinohara T., Hinuma S., Fujisawa Yu., Fujino M. Free fatty acids regulate insulin secretion from pancreatic beta cells through GPR40. *Nature*. 2003. V. 422 (6928). P. 173–176.
<https://doi.org/10.1038/nature01478>
- Kebede M.A., Alquier T., Latour M.G., Poitout V. Lipid receptors and islet function: therapeutic implications? *Diabetes Obesity and Metabolism*. 2009. V. 11 (4). P. 10–20.
<https://doi.org/10.1111/j.1463-1326.2009.01114.x>
- Kim M.J., Lee K.H., Min D.S., Yoon S.H., Hahn S.J., Kim M.S., Jo Y.H. Distributional patterns of phospholipase C isozymes in rat pancreas. *Pancreas*. 2001b. V. 22 (1). P. 47–52.
<https://doi.org/10.1097/00006676-200101000-00008>
- Kim M.R., Kusakabe Y., Miura H., Shindo Y., Ninomiya Y., Hino A. Regional expression patterns of taste receptors and gustducin in the mouse tongue. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2003. V. 312 (2). P. 500–506.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2003.10.137>
- Kim S.S., Jun K., Jeong M., Ryu S.H., Suh P.G., Shin H.S. Immunohistochemical localization of eight phospholipase C isozymes in pancreatic islets of the mouse. *Experimental and Molecular Medicine*. 2001a. V. 33 (3). P. 164–168.
<https://doi.org/10.1038/emm.2001.28>
- Kojima I., Medina J., Nakagawa Y. Role of the glucose-sensing receptor in insulin secretion. *Diabetes, Obesity and Metabolism*. 2017. V. 19 (1). P. 54–62.
<https://doi.org/10.1111/dom.13013>
- Komatsu M., Takei M., Ishii H., Sato Y. Glucose-stimulated insulin secretion: A newer perspective. *Journal of Diabetes Investigations*. 2013. V. 4. № 6. P. 511–516.
<https://doi.org/10.1111/jdi.12094>
- Kotarsky K., Nilsson N.E., Flodgren E., Owman C., Olde B. A human cell surface receptor activated by free fatty acids and thiazolidinedione drugs. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2003. V. 301 (2). P. 406–410.
[https://doi.org/10.1016/s0006-291x\(02\)03064-4](https://doi.org/10.1016/s0006-291x(02)03064-4)
- Kwok-Keung Fung B., Stryer L.J. Photolyzed rhodopsin catalyzes the exchange of GTP for bound GDP in retinal rod outer segments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1980. V. 77 (5). P. 2500–2504.
<https://doi.org/10.1073/pnas.77.5.2500>
- Kyriazis G.A., Smith K.R., Tyrberg B., Hussain T., Pratlley R.E. Sweet taste receptors regulate basal insulin secretion and contribute to compensatory insulin hypersecretion during the development of diabetes in male mice. *Endocrinology*. 2014. V. 155 (6). P. 2112–2121.
<https://doi.org/10.1210/en.2013-2015>
- Kyriazis G.A., Soundarapandian M.M., Tyrberg B. Sweet taste receptor signaling in beta cells mediates fructose-induced potentiation of glucose-stimulated insulin secretion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012. V. 109 (8). P. E524–E532.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1115183109>
- Lee B., Bradford P.G., Laychock S.G. Characterization of inositol 1,4,5-trisphosphate receptor isoform mRNA expression and regulation in rat pancreatic islets, RINm5F cells and betaHC9 cells. *Journal of molecular endocrinology*. 1998. V. 21 (1). P. 31–39.
<https://doi.org/10.1677/jme.0.0210031>
- Lee B., Laychock S.G. Inositol 1,4,5-trisphosphate receptor isoform expression in mouse pancreatic islets: effects of carbachol. *Biochemical Pharmacology*. 2001. V. 61 (3). P. 327–336.
[https://doi.org/10.1016/s0006-2952\(00\)00559-1](https://doi.org/10.1016/s0006-2952(00)00559-1)
- Leem J., Shim H.M., Cho H., Park J.H. Octanoic acid potentiates glucose-stimulated insulin secretion and expression of glucokinase through the olfactory receptor in pancreatic β -cells. *BBRC*. 2018. V. 503 (1). P. 278–284.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2018.06.015>
- Leung N.Y., Montell C. Unconventional Roles of Opsins. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*. 2017. V. 33. P. 241–264.
<https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-100616-060432>
- Li F., Zhang Z.M. Comparative identification of Ca²⁺ channel expression in INS-1 and rat pancreatic beta cells. *World Journal of Gastroenterology*. 2009. V. 15 (24). P. 3046–3050.
<https://doi.org/10.3748/wjg.15.3046>
- Liman E. TRPM5 and taste transduction. *Handb. Exp. Pharmacol.* 2007. V. 179. P. 287–298.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-34891-7_17
- Marie J.C., Rosselin G., Skoglund G. Pancreatic beta-cell receptors and G proteins coupled to adenylyl cyclase. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1996. V. 805. P. 122–131.
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1996.tb17478.x>
- Medina A., Nakagawa Y., Ma J., Li L., Hamano K., Akimoto T., Ninomiya Y., Kojima I. Expression of the glucose-sensing receptor T1R3 in pancreatic islet: changes in the expression levels in various nutritional and metabolic states. *Endocrine Journal*. 2014. V. 61 (8). P. 797–805.
<https://doi.org/10.1507/endocrj.ej14-0221>
- Medina J., Nakagawa Y., Nagasawa M., Fernandez A., Sakaguchi K., Kitaguchi T., Kojima I. Positive allosteric modulation of the calcium-sensing receptor by physiological concentrations of glucose *The Journal of Biological Chemistry*. 2016. V. 291 (44). P. 23126–23135.
<https://doi.org/10.1074/jbc.M116.729863>
- Miyazaki J., Araki K., Yamato E., Ikegami H., Asano T., Shibasaki Y., Oka Y., Yamamura K. Establishment of a

- pancreatic beta cell line that retains glucose-inducible insulin secretion: special reference to expression of glucose transporter isoforms. *Endocrinology*. 1990. V. 127 (1). P. 126–132.
<https://doi.org/10.1210/endo-127-1-126>
- Moran B.M., Abdel-Wahab Y.H.A., Flatt P.R., McKillop A.M. Evaluation of the insulin-releasing and glucose-lowering effects of GPR120 activation in pancreatic β -cells. *Journal of Biological Chemistry*. 2014. V. 16 (11). P. 1128–1139.
<https://doi.org/10.1111/dom.12330>
- Munakata Y., Yamada T., Imai J., Takahashi K., Tsukita S., Shirai Y., Kodama S., Asai Y., Sugisawa T., Chiba Y., Kaneko K., Uno K., Sawada S., Hatakeyama H., Kanzaki M., Miyazaki J.I., Oka Y., Katagiri H. Olfactory receptors are expressed in pancreatic β -cells and promote glucose-stimulated insulin secretion. *Scientific Reports*. 2018. V. 8 (1). P. 1499–1505.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-19765-5>
- Murovets V., Sozontov E., Zachepilo T. The Effect of the Taste Receptor Protein T1R3 on the Development of Islet Tissue of the Murine Pancreas. *Dokl Biol Sci*. 2019. V. 484 (1). P. 1–4.
<https://doi.org/10.1134/S0012496619010010>
- Nakagawa Y., Nagasawa M., Mogami H., Lohse M., Ninomiya Y., Kojima I. Multimodal function of the sweet taste receptor expressed in pancreatic β -cells: generation of diverse patterns of intracellular signals by sweet agonists. *Endocrine Journal*. 2013. V. 60 (10). P. 1191–1206.
<https://doi.org/10.1507/endocrj.ej13-0282>
- Nakagawa Y., Nagasawa M., Yamada S., Hara A., Mogami H., Nikolaev V.O., Lohse M.J., Shigemura N., Ninomiya Y., Kojima I. Sweet taste receptor expressed in pancreatic beta-cells activates the calcium and cyclic AMP signaling systems and stimulates insulin secretion. *PLoS One*. 2009. V. 4 (4): e5106.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005106>
- Nakagawa Y., Ohtsu Y., Nagasawa M., Shibata H., Kojima I. Glucose promotes its own metabolism by acting on the cell-surface glucose-sensing receptor T1R3. *Endocrine Journal*. 2014. V. 61 (2). P. 119–131.
<https://doi.org/10.1507/endocrj.ej13-0431>
- Nordenskjöld F., Andersson B., Islam M.S. Expression of the Inositol 1,4,5-Trisphosphate Receptor and the Ryanodine Receptor Ca²⁺-Release Channels in the Beta-Cells and Alpha-Cells of the Human Islets of Langerhans. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2020. V. 1131. P. 271–279.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-12457-1_11
- Noushmehr H., D'Amico E., Farilla L., Hui H., Wawrowsky K.A., Mlynarski W., Doria A., Abumrad N.A., Perfetti R. Fatty acid translocase (FAT/CD36) is localized on insulin-containing granules in human pancreatic beta-cells and mediates fatty acid effects on insulin secretion. *Diabetes*. 2005. V. 54 (2). P. 472–481.
<https://doi.org/10.2337/diabetes.54.2.472>
- Oya M., Suzuki H., Watanabe Y., Sato M., Tsuboi T. Amino acid taste receptor regulates insulin secretion in pancreatic β -cell line MIN6 cells. *Genes to Cells*. 2011. V. 16 (5). P. 608–616.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2443.2011.01509.x>
- Ozdener M.H., Subramaniam S., Sundaresan S., Sery O., Hashimoto T., Asakawa Y., Besnard P., Abumrad N.A., Khan N.A. CD36- and GPR120-mediated Ca²⁺-signaling in human taste bud cells mediates differential responses to fatty acids and is altered in obese mice. *Gastroenterology*. 2014. V. 146 (4). P. 995–1005.
<https://doi.org/10.1053/j.gastro.2014.01.006>
- Phan H.H., Boissard C., Pessah M., Regnaud K., Emami S., Gespach C., Rosselin G. Decreased ADP-ribosylation of the Galpha(olf) and Galpha(s) subunits by high glucose in pancreatic B-cells. *BBRC*. 2000. V. 271 (1). P. 86–90.
<https://doi.org/10.1006/bbrc.2000.2580>
- Philippaert K., Pironet A., Mesuere M., Sones W., Vermeiren L., Kerselaers S., Pinto S., Segal A., Antoine N., Gysemans C., Laureys J., Lemaire K., Gilon P., Cuypers E., Tytgat J., Mathieu C., Schuit F., Rorsman P., Talavera K., Voets T., Vennekens R. Steviol glycosides enhance pancreatic beta-cell function and taste sensation by potentiation of TRPM5 channel activity. *Nature Communications*. 2017. V. 8. P. 14733–14738.
<https://doi.org/10.1038/ncomms14733>
- Portela-Gomes G.M., Abdel-Halim S.M. Overexpression of Gs proteins and adenylyl cyclase in normal and diabetic islets. *Pancreas*. 2002. V. 25 (2). P. 176–181.
<https://doi.org/10.1097/00006676-200208000-00011>
- Prawitt D., Monteilh-Zoller M.K., Brixel L., Spangenberg C., Zabel B., Fleig A., Penner R. TRPM5 is a transient Ca²⁺-activated cation channel responding to rapid changes in [Ca²⁺]_i. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2003. V. 100 (25). P. 15166–15171.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2334624100>
- Qian F., Huang P., Ma L., Kuznetsov A., Tamarina N., Philipson L.H. TRP genes: candidates for nonselective cation channels and store-operated channels in insulin-secreting cells. *Diabetes*. 2002. V. 51 (1). P. 183–189.
<https://doi.org/10.2337/diabetes.51.2007.s183>
- Régnault K.L., Leteurtre E., Gutkind S.J., Gespach C.P., Emami S. Activation of adenylyl cyclases, regulation of insulin status, and cell survival by G(alpha)olf in pancreatic beta-cells. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2002. V. 282 (3). P. R870–R880.
<https://doi.org/10.1152/ajpregu.00374.2001>
- Rodríguez-Trelles F., Tarrío R., Ayala F.J. Is ectopic expression caused by deregulatory mutations or due to gene-regulation leaks with evolutionary potential? *Bioessays*. 2005. V. 27 (6). P. 592–601.
<https://doi.org/10.1002/bies.20241>
- Romanov R.A., Rogachevskaja O.A., Khokhlov A.A., Kolesnikov S.S. Voltage dependence of ATP secretion in mammalian taste cells. *Journal of General Physiology*. 2008. V. 132(6). P. 731–744.
<https://doi.org/10.1085/jgp.200810108>

- Roper S.D., Chaudhari N. Taste buds: cells, signals and synapses. *Nature Reviews Neuroscience*. 2017. V. 18. № 8. P. 485–497.
<https://doi.org/10.1038/nrn.2017.68>
- Rosker C., Meur G., Taylor E.J., Taylor C.W. Functional ryanodine receptors in the plasma membrane of RINm5F pancreatic beta-cells. *The Journal of Biological Chemistry*. 2009. V. 284 (8). P. 5186–5194.
<https://doi.org/10.1074/jbc.M805587200>
- Rössler P., Kroner C., Freitag J., Noè J., Breer H. Identification of a phospholipase C beta subtype in rat taste cells. *European Journal of Cell Biology*. 1998. V. 77 (3). P. 253–261.
[https://doi.org/10.1016/s00171-9335\(98\)80114-3](https://doi.org/10.1016/s00171-9335(98)80114-3)
- Salehi A., Flodgren E., Nilsson N. E., Jimenez-Feltstrom J., Miyazaki J., Owman C., Olde B. Free fatty acid receptor 1 (FFA1R/GPR40) and its involvement in fatty-acid-stimulated insulin secretion. *Cell and Tissue Research*. 2005. V. 322 (2). P. 207–215.
<https://doi.org/10.1007/s00441-005-0017-z>
- Schnell S., Schaefer M., Schöfl C. Free fatty acids increase cytosolic free calcium and stimulate insulin secretion from β -cells through activation of GPR40. *Molecular and Cellular Endocrinology*. 2007. V. 263 (1–2). P. 173–180.
<https://doi.org/10.1016/j.mce.2006.09.013>
- Seed Ahmed M., Kovoov A., Nordman S., Abu Seman N., Gu T., Efendic S., Brismar K., Östenson C.G., Gu H.F. Increased expression of adenylyl cyclase 3 in pancreatic islets and central nervous system of diabetic Goto-Kakizaki rats: a possible regulatory role in glucose homeostasis. *Islets*. 2012. V. 4 (5). P. 343–348.
<https://doi.org/10.4161/isl.22283>
- Shapiro H., Shachar S., Sekler I., Hershfinkel M., Walker M.D. Role of GPR40 in fatty acid action on the β cell line INS-1E. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2005. V. 335 (1). P. 97–104.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2005.07.042>
- Shigemura N., Nakao K., Yasuo T., Murata Y., Yasumatsu K., Nakashima A., Katsukawa H., Sako N., Ninomiya Y. Gurmardin sensitivity of sweet taste responses is associated with co-expression patterns of T1r2, T1r3, and gustducin. *BBRC*. 2008. V. 367 (2). P. 356–363.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2007.12.146>
- Skoglund G., Basmaciogullari A., Rouot B., Marie J.C., Rosselin G. Cell-specific localization of G protein alpha-subunits in the islets of Langerhans. *Journal of Endocrinology*. 1999. V. 162 (1). P. 31–37.
<https://doi.org/10.1677/joe.0.1620031>
- Steneberg P., Rubins N., Bartoov-Shifman R., Walker M.D., Edlund H. The FFA receptor GPR40 links hyperinsulinemia, hepatic steatosis, and impaired glucose homeostasis in mouse. *Cell Metabolism*. 2005. V. 1 (4). P. 245–258.
<https://doi.org/10.1016/j.cmet.2005.03.007>
- Stumpf I., Mühlbauer E., Peschke E. Involvement of the cGMP pathway in mediating the insulin-inhibitory effect of melatonin in pancreatic beta-cells. *Journal of Pineal Research*. 2008. V. 45 (3). P. 318–327.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2008.00593.x>
- Swatton J.E., Morris S.A., Cardy T.J., Taylor C.W. Type 3 inositol trisphosphate receptors in RINm5F cells are biphasically regulated by cytosolic Ca²⁺ and mediate quantal Ca²⁺ mobilization. *The Biochemical Journal*. 1999. V. 344 (1). P. 55–60.
- Taneera J., Lang S., Sharma A., Fadista J., Zhou Y., Ahlqvist E., Jonsson A., Lyssenko V., Vikman P., Hansson O., Parikh H., Korsgren O., Soni A., Krus U., Zhang E., Jing X.J., Esguerra J.L., Wollheim C.B., Salehi A., Rosengren A., Renström E., Groop L. A systems genetics approach identifies genes and pathways for type 2 diabetes in human islets. *Cell Metabolism*. 2012. V. 16 (1). P. 122–134.
<https://doi.org/10.1016/j.cmet.2012.06.006>
- Tang B., Chow J.Y., Dong T.X., Yang S.M., Lu D.S., Carethers J.M., Dong H. Calcium sensing receptor suppresses human pancreatic tumorigenesis through a novel NCX1/Ca(2+)/ β -catenin signaling pathway. *Cancer Letters*. 2016. V. 377 (1). P. 44–54.
<https://doi.org/10.1016/j.canlet.2016.04.027>
- Tomita T., Masuzaki H., Iwakura H., Fujikura J., Noguchi M., Tanaka T., Ebihara K., Kawamura J., Komoto I., Kawaguchi Y., Fujimoto K., Doi R., Shimada Y., Hosoda K., Imamura M., Nakao K. Expression of the gene for a membrane-bound fatty acid receptor in the pancreas and islet cell tumours in humans: evidence for GPR40 expression in pancreatic beta cells and implications for insulin secretion. *Diabetologia*. 2006. V. 49 (5). P. 962–968.
<https://doi.org/10.1007/s00125-006-0193-8>
- Udagawa H., Hiramoto M., Kawaguchi M., Uebanso T., Ohara-Imaizumi M., Nammo T., Nishimura W., Yasuda K. Characterization of the taste receptor-related G-protein, α -gustducin, in pancreatic β -cells. *Journal of Diabetes Investigation*. 2020. V. 11 (4). P. 814–822.
<https://doi.org/10.1111/jdi.13214>
- Wallin T., Ma Z., Ogata H., Jørgensen I.H., Iezzi M., Wang H., Wollheim C.B., Björklund A. Facilitation of fatty acid uptake by CD36 in insulin-producing cells reduces fatty-acid-induced insulin secretion and glucose regulation of fatty acid oxidation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular and Cell Biology of Lipids*. 2010. V. 1801 (2). P. 191–197.
<https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2009.11.002>
- Wong G.T., Gannon K.S., Margolskee R.F. Transduction of bitter and sweet taste by gustducin. *Nature*. 1996. V. 381. P. 796–800.
- Wong S.T., Trinh K., Hacker B., Chan G.C., Lowe G., Gaggar A., Xia Z., Gold G.H., Storm D.R. Disruption of the type III adenylyl cyclase gene leads to peripheral and behavioral anosmia in transgenic mice. *Neuron*. 2000. V. 27 (3). P. 487–497.
[https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(00\)00060-x](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(00)00060-x)
- Xue T., Do M.T., Riccio A., Jiang Z., Hsieh J., Wang H.C., Merbs S.L., Welsbie D.S., Yoshioka T., Weissgerber P., Stolz S., Flockerzi V., Freichel M., Simon M.I.,

- Clapham D.E., Yau K.W. Melanopsin signalling in mammalian iris and retina. *Nature*. 2011. V. 479 (7371). P. 67–73.
<https://doi.org/10.1038/nature10567>
- Yau K.W., Hardie R.C. Phototransduction motifs and variations. *Cell*. 2009. V. 139 (2). P. 246–264.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.09.029>
- Zhang D., So W.Y., Wang Y., Wu S.Y., Cheng Q., Leung P.S. Insulinotropic effects of GPR120 agonists are altered in obese diabetic and obese non-diabetic states. *Clinical Science (London, England:1979)*. 2017. V. 131 (3). P. 247–260.
<https://doi.org/10.1042/CS20160545>
- Zhang Y., Hoon M.A., Chandrashekar J., Mueller K.L., Cook B., Wu D., Zuker C.S., Ryba N.J. Coding of sweet, bitter, and umami tastes: different receptor cells sharing similar signaling pathways. *Cell*. 2003. V. 112 (3). P. 293–301.
[https://doi.org/10.1016/s0092-8674\(03\)00071-0](https://doi.org/10.1016/s0092-8674(03)00071-0)
- Zigman J.M., Westermark G.T., LaMendola J., Boel E., Steiner D.F. Human G(olf) alpha: complementary deoxyribonucleic acid structure and expression in pancreatic islets and other tissues outside the olfactory neuroepithelium and central nervous system. *Endocrinology*. 1993. V. 133 (6). P. 2508–2514.
<https://doi.org/10.1210/endo.133.6.8243272>
- Zigman J.M., Westermark G.T., LaMendola J., Steiner D.F. Expression of cone transducin, Gz alpha, and other G-protein alpha-subunit messenger ribonucleic acids in pancreatic islets. *Endocrinology*. 1994. V. 135 (1). P. 31–37.
<https://doi.org/10.1210/endo.135.1.8013366>

УДК 004.932.2

РАСПОЗНАВАНИЕ ПРОЕКТИВНО ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ПЛОСКИХ ФИГУР. XVI. ОКТЕТ ПРОЕКТИВНО СТАБИЛЬНЫХ ВЕРШИН ОВАЛА И НОВЫЕ МЕТОДЫ ЭТАЛОННОГО ЕГО ОПИСАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ОКТЕТ

© 2022 г. П. П. Николаев^{1,2,*}

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

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

*E-mail: nikol@iitp.ru

Поступила в редакцию 25.08.2021 г.

После доработки 23.09.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

Предложена и иллюстрирована модельными экспериментами идея существования у овала (\mathbf{o}) октета проективно инвариантных вершин, получаемых при условии численной локализации внешней прямой HL (“линии горизонта”), которая фиксируется на этапе оптической регистрации фигуры \mathbf{o} либо вычисляется при наличии свойств центральной симметрии кривой быстрыми алгоритмами поиска центра, детерминирующего положение HL . Согласно теореме о произвольной внешней прямой L в композиции с \mathbf{o} — на L всегда существует не менее двух пар стабильных точек (именуемых дуальными — ДП), а каждая ДП задает на \mathbf{o} инвариантный квартет вершин, в итоге успешной позиционной оценки которых контуру оказывается инцидентен сет из восьми упорядоченных вершин, и этот сет целесообразно привлечь для проективно инвариантного описания \mathbf{o} . Высказаны и исследованы в симуляциях две гипотезы для HL : о проективной связи позиций двух пар ДП и о возможности для аксиально симметричного \mathbf{o} оценить положение присущей ему HL на основании неких проективных признаков, выявляемых для ДП. Описаны два новых метода поиска центра у \mathbf{o} со скрытой радиальной симметрией. Предложены и испытаны в численных экспериментах два новых метода привлечения найденного у \mathbf{o} (с симметриями и без них) октета стабильных точек контура для проективно инвариантного описания \mathbf{o} .

Ключевые слова: овал, центр и ось симметрии, плюккеровы полюс и поляра, дуальные пары, гармонический вурф, вурф-функция, дескриптор, шаблон дескриптора, кривая Ламе

DOI: 10.31857/S023500922201005X

ВВЕДЕНИЕ

В статье описываются и с привлечением компьютерных симуляций обсуждаются новые аспекты (сценарии задач, методы и численные схемы их решения) развития темы, отраженной в цикле авторских работ по распознаванию овальной фигуры \mathbf{o} по плоской центральной ее проекции инвариантно к группе дробно линейных (иначе — проективных) преобразований плоского контура \mathbf{o} в пространстве сцены. Объект этого исследования — кривые семейства \mathbf{o} — плоские гладкозамкнутые фигуры (не предполагающие формул аналитического описания, единых для семейства \mathbf{o} и не имеющие опорных элементов контура \mathbf{o} , традиционно используемых в распознавании фигур по особенностям их геометрии, —

наподобие точек излома, перегиба, спрямления, двойного касания и прочего).

Эти соображения делают понятными трудности в попытках получить устойчивое описание \mathbf{o} , не зависящее от ракурса оптической регистрации \mathbf{o} технической системой распознавания: исключительно дифференциальные методы анализа \mathbf{o} , обеспечивающие ее инвариантное описание (эти приемы давно предложены в теории плоских кривых (Картан, 1933)), не пригодны для дискретного входного задания \mathbf{o} — в силу точностных требований к оценке локальных производных высокого порядка у “поточечно” описываемой кривой, каковые абсолютно нереализуемы практически (при любых технически возможных характеристиках камер). По упомянутым причинам для инвариантной (и не затратной, как это, в принципе,

реализуемо полнопереборными методами для дискретно заданного \mathbf{o}) репрезентации \mathbf{o} необходимо получить какие-то дополнительные данные о его структуре. Ресурсно экономные методы анализа и проективно инвариантного опознавания \mathbf{o} возможны в случае задания \mathbf{o} совместно с *линейным элементом* (точной либо прямой произвольной ориентации относительно \mathbf{o} (Николаев, 2011; 2019)) в плоскости \mathbf{o} . Если же про \mathbf{o} априори известно, что ему присущи свойства *симметрии*, то таким дополнительным атрибутом его описания может послужить линия горизонта HL , однозначно связанная позиционно для любых \mathbf{o} неявной *центральной* симметрии разных типов (радиальной, поворотной либо совмещающей аксиальные и центральные ее аспекты, как это присуще кривым Ламе). Схемы и быстрые алгоритмы поиска элементов симметрии (полного набора ее вариантов) разработаны, численно промоделированы и описаны (Николаев, 2014; 2016). Согласно **теореме 1** об инвариантных свойствах прямой $extL$, внешней относительно \mathbf{o} (Балицкий и др., 2017) на $extL$ имеется не менее двух пар точек (именуемых здесь “дуальными парами” ДП), где каждая ДП в терминах Плюккерова “полус-полярного соответствия” дуально симметрична по полюсам, инцидентным $extL$. Каждая ДП детерминирует на контуре \mathbf{o} свой квартет проективно инвариантных вершин, что для двух ДП однозначно задает сет из восьми упорядоченных точек контура (*октет* \mathbf{o}). Если же от произвольной $extL$ перейти к HL для \mathbf{o} (вычисляемой для центрально симметричных \mathbf{o} либо регистрируемых оптически камерой с фиксацией *линии горизонта* как функции ракурса съемки), то в этой постановке представляется целесообразным найденный по HL октет вершин использовать в задаче инвариантного описания \mathbf{o} , не требующего расширения “атрибутов сцены” до композиций “ $\mathbf{o} + extL$ ” либо “ $\mathbf{o} + intP$ ” (вариант с тестовым полюсом), производя репрезентацию \mathbf{o} в категориях, имманентных исключительно особенностям его *геометрии*. Эта идея имеет дополнительный бонус в части “эталонирования формы \mathbf{o} ”: малоразмерным дескриптором (циклическим 8-вершинным графом на плоскости вурфов) либо перепроецированием \mathbf{o} на некий правильный n -вершинник, для чего мы предлагаем *новый вид* репрезентации — “на ромб и квадрат” (8-вершинный стандарт), о важных преимуществах какового в сравнении с предложенным нами ранее вариантом проекции на 4-вершинник будет сообщено далее. В соответствующих разделах обсудим методы и модельные реализации, формирующие сет ДП, октеты для \mathbf{o} и “конструкты его инвариантной репрезентации” (дескрипторы и “двойные эталонные проекции”) для сценических вариантов: аксиально симметричный \mathbf{o} , центрально (и “поворотно”) симметричный \mathbf{o} , кривые Ламе (подсемейство суперэл-

липсов, принадлежащее семейству \mathbf{o}) и, наконец, \mathbf{o} общего вида, симметриями не обладающий.

Немалый объем текста посвящен также рассмотрению двух гипотез, вызванных “логически внятным стремлением”: произвести универсализацию идеи о наличии у *любых* \mathbf{o} *октета* проективно инвариантных вершин (если локализация HL обеспечена) и показать возможности оптимизации поиска ДП на HL в предположении, что позиции ДП связаны неким дополнительным условием в случаях \mathbf{o} с симметриями. Первая гипотеза выглядела априори провальной, поскольку именно для *аксиально* симметричных \mathbf{o} относительно “их потенциала” в реконструкции расположения HL “теория недвусмысленно декларирует” возможность вычисления *лишь одной* точки, HL принадлежащей: ей соответствует полюс P плюккеровой полярной, являющейся “по совместительству” неявной *осью* \mathbf{o} (а положение оси всегда можно оценить в универсальной переборной схеме, с асимптотикой сложности $n \log n$), т.е. вместо точной локализации HL гарантирован шанс получения проективного пучка “гипотез \mathbf{o} HL ” с центром в P . Если бы получила подтверждение вторая гипотеза “о связи позиций двух ДП”, то “положительные вычислительные примеры” могли бы стать побудительным мотивом для расширения деклараций упомянутой **теоремы 1** относительно конкретных свойств HL . В силу этих интуитивных ожиданий модельный эксперимент в направлении “выбор истинной HL из пучка гипотез в анализе позиционных оценок ДП” представлялся вполне осмысленным (он проведен на материале четырех сгенерированных вариантов \mathbf{o} с аксиальной симметрией (рис. 1), итоги чего рассмотрены в разд. 1).

Следует коснуться истории вопроса (октет на контуре \mathbf{o}) в связи с 10-й (X) статьей данного цикла исследований, где термин “октет” фигурирует в подзаголовке (Николаев, 2017). Рассмотрение 8-точечных конфигураций, возникающих на овальной кривой, не было там связано со свойствами HL , а привлекало внимание к возможному единообразию для схем дескрипторов в примерах сцен с \mathbf{o} разного генезиса: при экспериментальном анализе идеи об *односвязной* проективной природе *траекторий* для триад “эллиптических точек” (содержание **теоремы 2** о точках пересечения введенных ранее H - и T -поляр (Савчик, Николаев, 2016)), где октет соотношен с позициями восьми экстремальных кривизн триады траекторий; на \mathbf{o} общего вида, в вариантах, фиксированных для них *контурной* M либо *внутренней* $intP$ позиций, для которых в соответствии с **теоремой 2** вычисляется триада эллиптических точек, позволяющая по ним аппроксимировать некую прямую, что в свою очередь дает шанс оценить координаты двух ДП, детерминирующих сет восьми вершин контура \mathbf{o} . Переход от найденной диспозиции октета

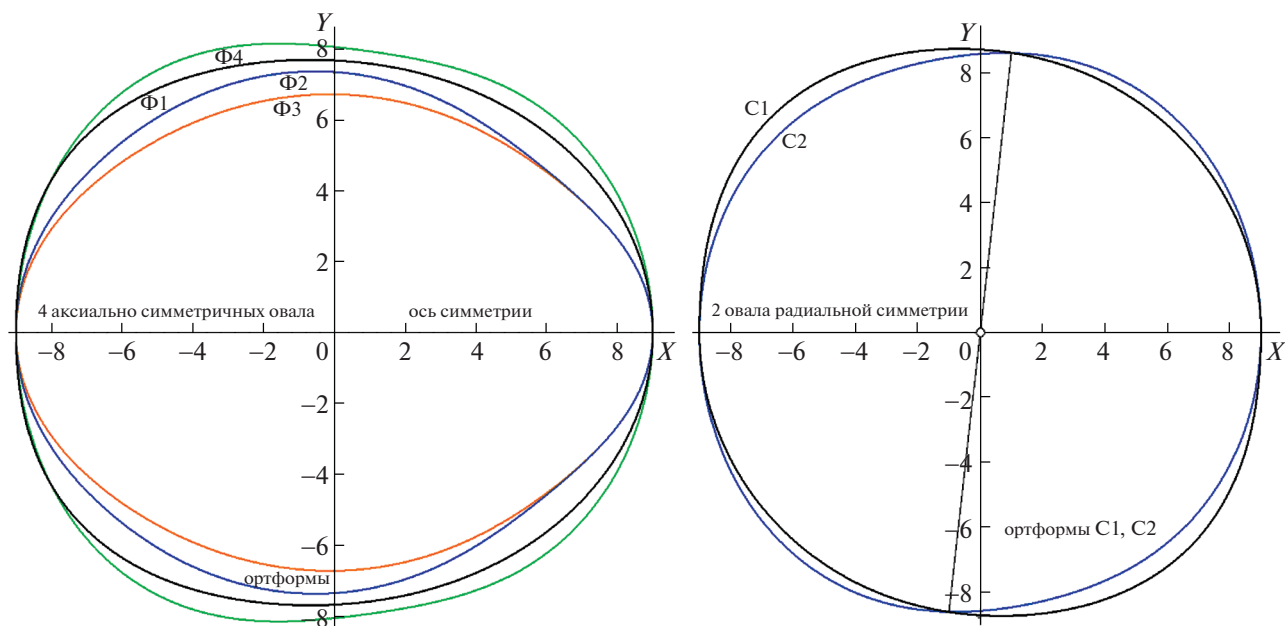


Рис. 1. Вид ортоформ, использованных в модельных демонстрациях, осесимметричных $\Phi 1$ – $\Phi 4$ и $C 1, C 2$ радиальной симметрии (разд. 1 и 3). Остальные пояснения в тексте.

к схеме дескриптора обосновывался заявлениями **теоремы 3** (Депутатов, 1926) о существовании набора из двух независимых вурфов (названного “плоскостным вурфом” – как антитеза “линейному” (Глаголев, 1963), вычисляемому на *прямой*) для любой упорядоченной пятерки точек, принадлежащих гладкой выпуклой дуге (два вурфа – это пара координат *точки* на числовой плоскости вурфов). Производя для ансамбля из пяти соседствующих вершин циклический обход октета, получаем замкнутый 8-вершинник дескриптора. Схемы вычисления пары вурфов (шаблоны) для описываемой вершины октета можно предложить во многих вариантах. В последующих разделах (на примерах Φ разного типа) будут рассмотрены и иллюстративно предьявлены дескрипторы с минимальным (5-шаблон) и максимально возможным (8-шаблон) привлечением вершин Φ для задания описываемой вершины графа.

Дальнейшее повествование исключает обсуждение аспектов, обеспечивающих (методами обнаружения, подчеркивания и сглаживания “регистрируемых границ фигур”, – в их качестве стандартных фаз обработки изображений) получение “продукта анализа” для нашего исследования – в виде “контура Φ ” (тем более, при изложении развиваемых теоретических тезисов, конкретно соотносимых с разделами проективной геометрии плоских кривых). Итак, *граница Φ* и ее *инвариантные* геометрические характеристики фигурируют в качестве “данных автоматического анализа Φ в практической задаче по его опознанию/классификации”. Нас будут интересовать

численно реализуемые подходы (с устойчиво воспроизводимыми особенностями), где координаты, задающие границу Φ сетом *вершин* “оцифровки”, итогом дискретной обработки Φ формируют *инвариантное* его описание, создавая механизм классификации разнообразных гладких фигур методами *проективно эквивалентных* выборов, либо производят “*эталонное описание*” Φ – для последующих технических нужд (практических задач автономного опознания объектов).

Как и в предшествующих статьях цикла, под *неявной* формой представительства элементов симметрии (ЭС) подразумеваются особенности их проявления в *проективной* форме, не совпадающей с признаками ЭС в геометрии Декарта (где *осевую* симметрию описывает правило “хорды, перпендикулярные *оси*, делятся ею пополам”, а *радиальная* – задается свойством: “хорды, включающие *центр*, разделяются им на равные части”). В проективной геометрии неопределимы “перпендикулярность” и операция деления отрезка пополам. Методы поиска ЭС, опирающиеся на *проективно инвариантные* признаки, эффективны в широком диапазоне смены “ракурсов регистрации” Φ , в математической модели следуя законам лучевой оптики для камеры-обскуры. Простейшую разновидность наличия свойств симметрии у Φ (декартовых признаки) будем называть его *ортоформой*. В терминах ракурса ввода ее продуцирует камера ортогональной ориентации к плоскости Φ . Прежде чем перейти к обсуждению задачи выбора наилучшей гипотезы об *HL* (из числа возможных в пучке для полюса *P*) в

случае *осесимметричного* \mathbf{o} , традиционно уведомим читателя, что данный текст адресуется интересующимся вопросами автономного анализа формы, не предполагая навыков профессиональной подготовки в этой сфере. Для уяснения сути обсуждаемых проблем и понимания модельных итогов работы достаточно ориентироваться в общих вопросах естественнонаучного плана. Мысли автора донесены здесь в образной геометрической форме. Точное понимание деталей в вводимых далее нотациях, схемах и приемах обработки не обязательно для знакомства с миром образов и логикой обсуждаемых идей. Текст насыщен подробными иллюстрациями (“графическими копиями продуктов компьютерного моделирования”, полученных для разных сценариев с \mathbf{o}), снабженных комментариями, что, возможно, удовлетворит и неспециалистов. Тема “как полюс-полярный дуализм коник и теорема взаимности помогают понять идеи и методы проективного анализа \mathbf{o} ”, доходчиво рассмотрена в статье (Акимова и др., 2014).

1. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ДП В ЗАДАЧЕ ПОИСКА HL ПО НЕЯВНОЙ ОСИ СИММЕТРИИ \mathbf{O}

Кратко о генезисе “конструкта” ДП. Особенность “дуальная”, в нашем случае присущая *паре точек* прямой, — имеет истоком теорию полюс-полярного соответствия для квадратичных кривых (коник) и базовую “теорему взаимности” для них (Глаголев, 1963; Моденов, 1969). Тезисы теоремы подсказали продуктивность введения в аппарат анализа \mathbf{o} двух инструментов: H -поляры, следующей правилам *гармонических отношений*, и “на языке *касательных* формируемой” T -поляры. Детализируем взаимосвязь *полюса* и *поляры* “из мира коник”: плюккерова *прямолинейная поляр* соответствует прямой, проходящей через точки касания к эллипсу из внешнего *полюса* (потому связь их позиций взаимно однозначна). Точка (на кривой) T -поляры и задающая ее хорда на \mathbf{o} , образуют комплекс “точка+отрезок”, соответствующий паре “полюс+поляр”. В работе (Акимова и др., 2014) сказано, что в диспозиции “внешний полюс, внутренняя поляр” однозначная их связь для \mathbf{o} общего вида неизменна при любых проективных трансформациях \mathbf{o} , что теряет свою приложимость для \mathbf{o} в ситуации “внешняя поляр, внутренний полюс”. Тем не менее из идеи теоремы взаимности удастся вычлениить “условное правило дуальности отношений”. “Вариативная” (одна степень позиционной свободы) связь позиций двух полюсов и двух плюккеровых поляр, гарантированная для коник, редуцируется в случае с \mathbf{o} к связи уже *уникальной*: для некоторой позиции полюса P_1 при \mathbf{o} можно искать такую позицию P_2 , что поляр p_1 пройдет через P_2 , а полюс P_1 будет принадлежать поляр p_2 . Эти два полюса

нефиксированного *внешнего* расположения стали исходным носителем дуальных свойств в **теореме 1**, заявляющей, что на прямой $extL$ *произвольного* ориентирования по отношению ко всякому \mathbf{o} всегда существует не менее двух проективно инвариантных ДП.

Уточнив природу ДП, перейдем к описанию компьютерных экспериментов, целью которых был поиск устойчивых признаков, позволяющих для *осесимметричного* \mathbf{o} — к точке полюса P симметрии, заведомо локализуемой на HL (по уже вычисленной позиции *оси*, являющейся плюккеровой поляр для P , что обеспечивают универсальные быстрые алгоритмы ее поиска (Николаев, 2015б)), добавить координаты любой второй точки, принадлежащей HL (например, F — в пересечении HL с осью $E-D$, см. рис. 2). Эта иллюстрация воспроизводит численно смоделированную сцену для \mathbf{o} $\Phi 1$, вид *ортоформы* которого показан на врезке слева вверху, тогда как основные построения отображают ту “пластичность” проективных свойств лучей из P к \mathbf{o} (в альтернативе вариантов выбора искомой вершины A , симметричная хорда=поляр $A-B$ которой имела бы полюс F на HL), что и в *ложной* позиции избранной вершины a демонстрирует “гармонизм” проективных инвариантов (вурфов), присущий истинному положению A : например, для “верного луча” к A справедлива оценка $W(P, M, F, N) = 1$ (врезка справа вверху), но и для версии с ложной a (врезка слева под ортоформой) показан аналогичный итог: $W(n, P, m, f) = 1$ (где n, m, f заданы на врезках цепочкой определений: $n \Rightarrow 1'-2' \times P-f, f \Rightarrow t(a) \times t(b), 1' \Rightarrow f-b \times P-D, 2' \Rightarrow f-a \times P-E, 3' \Rightarrow f-b \times P-E, m \Rightarrow o-3' \times P-f$, демонстрируя проективную аналогию тройки n, m, f , соотносимую с триадой N, M, F , где $N \Rightarrow 1-2 \times P-F, M \Rightarrow O-3 \times P-F, F \Rightarrow t(A) \times t(B), O \Rightarrow 1-2 \times E-D, 1 \Rightarrow t(B) \times P-D, 2 \Rightarrow t(A) \times P-E, 3 \Rightarrow F-B \times P-E$. Здесь и всюду далее значки “ \Rightarrow ”, “ $t(X)$ ” и “ \times ” следует понимать соответственно как операции “вычисляется”, “касательная в точке X ” и “на пересечении”, а цифры “1”, “2”, ..., “7” — это “имена” вспомогательных точек. Позиции контура I, R, J, L определены на врезках рис. 2, как и рецепты расчета служебных точек “4”, “5”, “6”, “7”, а также точки S , “связующей ДП”.

Для внятности описываемых далее процедурных решений, на некоторой стадии вычисления использующих понятие “гармонизма”, приведем “формулу *гармонического отношения*”, в качестве важнейшего выражения для фундаментального проективного инварианта, здесь именуемого *вурф* (в современных математических работах его чаще называют “*сложным* отношением четверки точек на прямой”). Для простоты определения ограничимся заданием вурфа через длины отрезков, на которые прямую разбивает квартет ее точек (т.е. определим *модуль* вурфа, где *знак* при

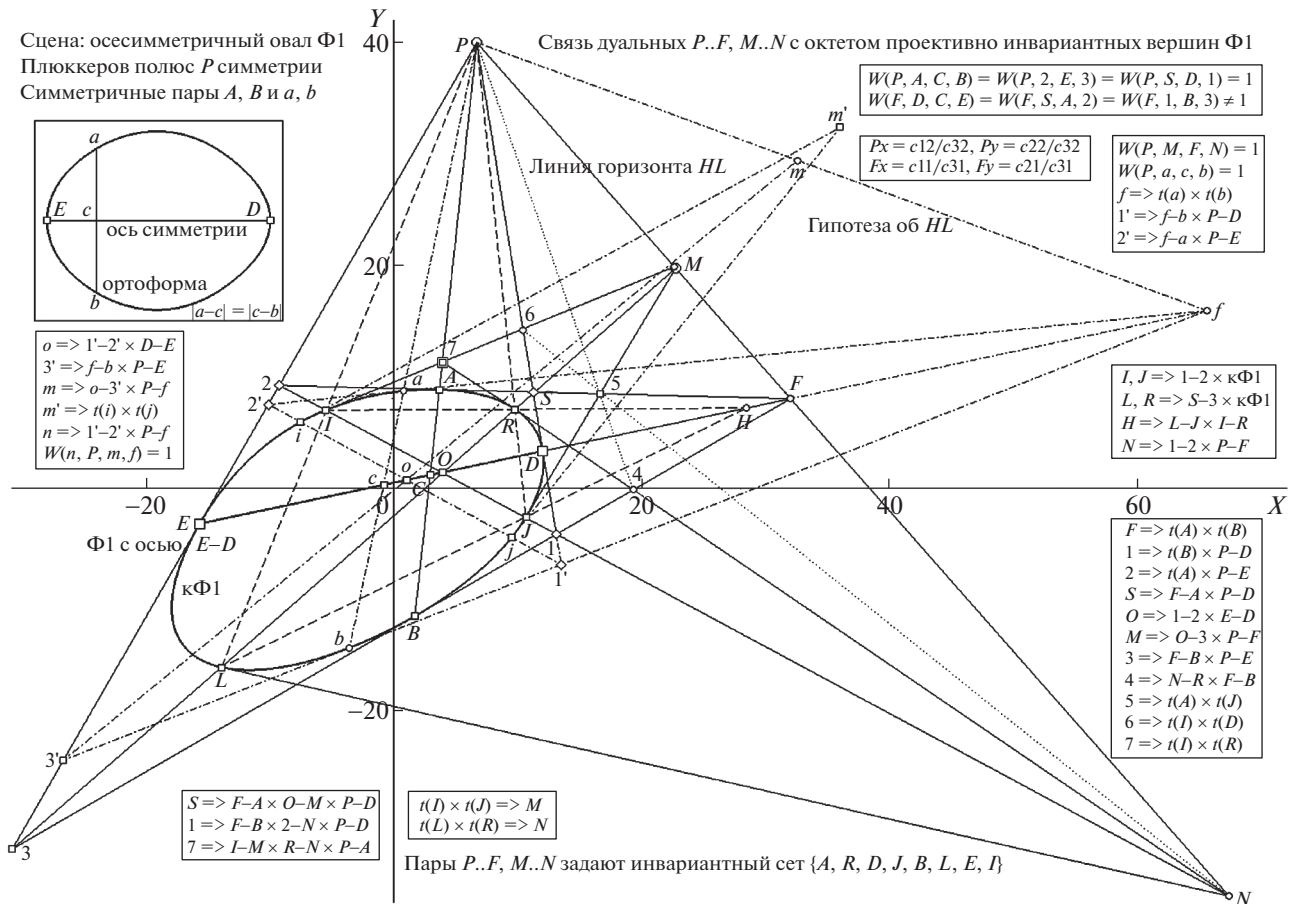


Рис. 2. Демонстрация альтернативности решений (на примере $\Phi 1$ осевой симметрии) в задаче локализации линии горизонта HL . На врезке слева показан вид ортоформы $\Phi 1$, а на остальных врезках приведены структурные формулы позиционной оценки для служебных точек и прямых. Построение для ложной гипотезы об HL выполнено штрихпунктирными прямыми: оно начинается с вершины-конкурента a . Показана схема детерминации октета $\{A, R, D, J, B, L, E, I\}$ дуальными парами $P..F, M..N$ на HL . Остальные пояснения в тексте.

численном инварианте, формируемом из ориентированных отрезков, нами проигнорирован). Обозначив через a, b и c длины отрезков в маркировке их следования на несущей прямой, получим значение 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 $w[a, b, c] \equiv 1$, 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 o являются характерной особенностью сцен при переходе от явного задания свойств симметрии (т.е. ортоформой) к неявному их представительству (реализующему требованию независимости результатов анализа o от оптического ракурса его регистрации, как – ортогональной – для ортоформы, так и для любой неортогональной). Вернемся к трак-

товке модельных (численных) процедур, геометрия o в которых задавалась напрямую цепью вершин аппроксимации (с управляемой плотностью представительства на контуре).

Продолжим рассмотрение осесимметричного $\Phi 1$ в неортогональной проекции, для которого вычислены координаты E, D оси и позиция полюса P , а объектами исследования являются положения двух ДП на прямой, целевая установка для которой – “быть линией горизонта” HL . В рамках той же задачи проследим, не поможет ли выбрать “истинный азимут для A ” гипотеза о позиционной связи двух ДП (“дуальность” неких пар P, F и M, N будем теперь фиксировать в виде $P..F$ и $M..N$), задаваемой через “связующие координаты” $S (S \Rightarrow i(A) \times t(D) \text{ эквивалентно } S \Rightarrow A-F \times D-P)$, что выражает реализация условия: “если найдена пара $P..F$ (т.е. определено пересечение *оси* с HL), то M пары $M..N$ принадлежит пересечению HL с $S-3$ (напомним: $3 \Rightarrow F-B \times P-E$), а N – пересечению с прямой “1–2”.

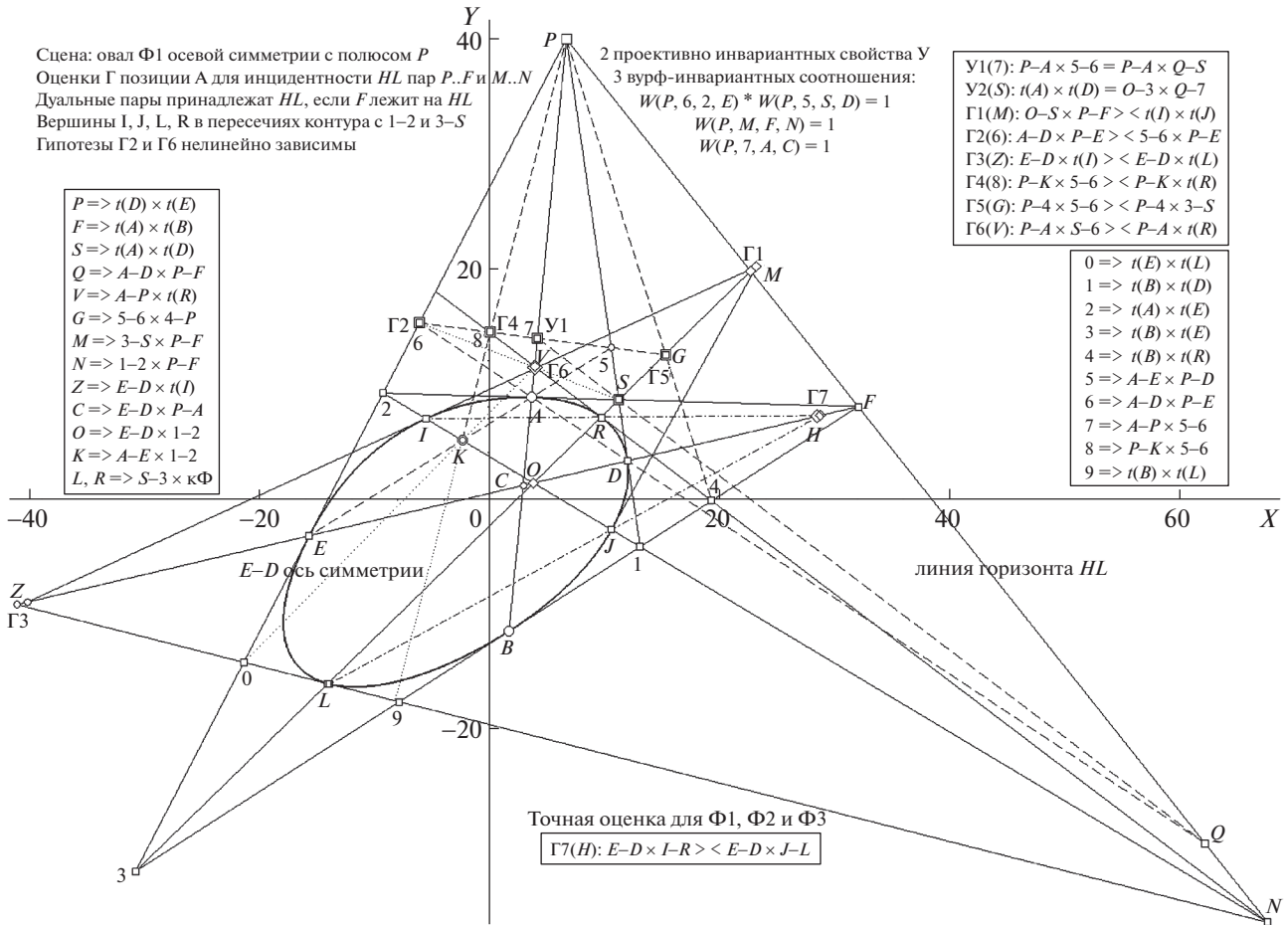


Рис. 3. Демонстрация узловых позиций (на примере с $\Phi 1$) для семи гипотез $\Gamma 1 \div \Gamma 7$ (при переборе по n позиций вершины $a(n)$ оценивается их близость к A для альтернативных построений, производимых в семи узлах) и показ условий $Y1, Y2$ и вурф-соотношений, не дающих отбраковать ложные варианты позиции HL в силу их универсального характера. Штриховой прямой выделен “особый” отрезок $G-6$, где проверяются $\Gamma 2, \Gamma 4, \Gamma 5, Y1$ (с ним проективно связан пунктирный $S-6$ с оцениваемой $\Gamma 6$). Остальные пояснения в тексте.

Вурф-оценки, связывающие гармонически координаты симметричных вершин, не могут помочь верной фиксации $HL: W(P, A, C, B) = W(P, a, c, b) = 1$. Равно бесплодны и попытки привлечь проективно связанные с ними оценки (верхняя врезка справа на рис. 2): $W(P, 2, E, 3) = W(P, S, D, 1) = 1$. Это же относится и к “осевым” негармоническим вурфам: $W(F, D, C, E) = W(F, S, A, 2) = W(F, 1, B, 3) \neq 1$. Отметим, что адекватное задаче положение поляр $A-B$ (означающее принадлежность ее полюса F “истинной” HL) действительно детерминирует искомый октет $\{A, R, D, J, B, L, E, I\}$, сосредоточив внимание на узловых фрагментах построенной сети касательных и хорд, где положение “пересечений” может изменять координатную привязку в зависимости от альтернативы вычисления позиции того или иного узла (например, M можно локализовать не только по “схеме” $O-3 \times P-F$, но и производя операцию $t(I) \times t(J)$; см. нижнюю левую врезку рис. 1). Целесообразно те-

перь обратиться к рис. 3, изображающему узловые места “карты проб” (и схемы оценок для них), для которой метод поиска желательных связей между элементами построения имел отправной точкой априорный список гипотез Γ (с акцентацией узлов, предположительно устойчиво локализующих искомую позицию A в ходе перебора вершин на дуге контура “без малого” от E до D), и список этих гипотез, интуитивно нами выбранных для серии тестовых экспериментов, “исчерпан” набором $\{\Gamma 1 \div \Gamma 7\}$ (а самая эффективная из них – $\Gamma 7$ – была предложена в финале “прогностического штурма”).

Кратко прокомментируем (рис. 3 исполнен в стиле адресации активному читателю и содержит существенно больше информации, чем будет обсуждено в тексте) суть гипотез в допущении, что связь для S проверяется в M единственно по $\Gamma 1 (O-S \times P-F) \langle t(I) \times t(J) \rangle$, см. правую верхнюю врезку, где значок “ $\langle \rangle$ ” имеет трактовку: “оцени-

ваются степень позиционного сближения левого и правого продукта операций), тогда как серия гипотез Г2, Г4, Г5 “тремякратно тестирует” прямую “5–6” (в узлах “6”, “8” и G), представляющую собой “индикатор гипотетически уникального сета свойств проективно стабильной точки на оси $E-D$, детерминированного фиксированной триадой $\{P, E, D\}$ ” (Николаев, 2017). Г6 (с узлом V , не принадлежащим штриховому отрезку “5–6”) также косвенно связана с проверками существования “стабильной точки”, являясь нелинейно зависимой от Г2 (что подтверждают эпюры, демонстрируемые в конце раздела).

В качестве дополнительного свидетельства трудностей выбора между “целью” и “шумом” (где A среди конкурентных a ?) рис. 3 включает и два универсальных условия $У$ тождественного позиционного задания узлов “7” и S “вроде бы” независимыми методами: “ $P-A \times 5-6 \equiv P-A \times Q-S$ ” и “ $t(A) \times t(D) \equiv O-3 \times Q-7$ ” (правая верхняя врезка рис. 3). В этот перечень логично включить и “не вполне очевидное” свойство: $W(P, 6, 2, E) * W(P, 5, S, D) = 1$. Не будем воспроизводить в тексте схемы операций всех Γ , вынесенные в верхнюю правую врезку; ограничимся записью для “лидера” Г7 (ее узел H): $E-D \times I-R \langle E-D \times J-L$ (нижняя врезка). Уточним: на каждом шаге перебора позиций $A(n)$ по номерам n вершин \bullet к квартету $\{E, D, A(n), B(n)\}$ по координатам “текущего” 4-вершинника $\{1, 2, 3, S\}$ – в пересечениях контура \bullet с его диагоналями – определяется и квартет $\{I(n), J(n), L(n), R(n)\}$, что завершает комплектацию текущего октета. Имея полную его карту, можно вычислять экстремумы сближений в паре тестируемых операций для семи узлов по списку $\{\Gamma 1 \div \Gamma 7\}$ (о полученных результатах – чуть ниже, до этого полезно упомянуть о ситуации с \bullet Ф4).

Аналогичные численные эксперименты были проведены на сгенерированных “по случайным” (не выбранным с целью “утвердить правоту” проверяемого тезиса) правилами осесимметричных Ф2, Ф3, Ф4. Результаты для Ф2 и Ф3 не привнесли ничего нового, лишь подтвердив приемлемую погрешность ошибки для предположения о “связующей роли” S (для задания ДП $M..N$ по диспозиции $P..T$, что в дальнейшем было оценено примерно с той же позиционной ошибкой для \bullet всех остальных типов симметрии и \bullet общего вида), и потому не приводятся в качестве иллюстраций. “Печальную неожиданность подарил” \bullet Ф4, развеяв надежды на Г7, бывшую абсолютным лидером на материале проб с Ф1 ÷ Ф3. Графическая информативность рис. 4 основным образом сконцентрирована на четырех врезках, показывающих схему 5-шаблона дескриптора и результат его привлечения для найденного по “истинной” HL октета $\{A, R, D, J, B, L, E, I\}$ (врезки внизу, слева и справа), а также распределение октета на ортоформе, помогающее понять организацию и вид

для нового (“двойного”) *эталонного описания* \bullet по схеме проецирования “на ромб и квадрат”, в случае *безошибочной* локализации HL (верхние врезки, соответственно слева и справа). На основном поле рис. 4 изображена сеть построений, в которой произошло нарушение *эмпирического* правила – о довольно точном совпадении хорды $R-L$ с диагональю $S-F$ (что произошло в ситуации, когда T принадлежит HL , а S успешно аппроксимирует результат $t(A) \times t(D)$; это отображается на левой верхней врезке для ортоформы и на основном поле рис. 4). Если в примерах с Ф1, Ф2 и Ф3 “вторичный” квартет $\{R, J, L, I\}$ локализовался на пересечениях контура \bullet с диагоналями описанного 4-вершинника (образованного на касательных к “первичному” квартету $\{A, D, B, E\}$ и на рис. 3 имевшего маркировку вершин не $\{S, G, F, K\}$, а $\{S, 1, 3, 2\}$), то для Ф4 “правильная” диагональ октета $L-R$ (синяя тонкая прямая) уже не совпадала с диагональю $S-F$ пересечений касательных в A, D и B, E . Этот “сбой” и повлек ряд существенных сдвигов в окрестностях L, I, M, N . По той же причине “не оправдала себя” Г7: прямые $I-R$ и $J-L$ не пересекались более на оси $E-D$ (что легко заметить на левой верхней врезке рис. 4 – в виде отчетливой *непараллельности* этой триады прямых для ортоформы). Прежде чем будет кратко обсуждена “динамика оценок сближения в узлах” по всем $\{\Gamma 1 \div \Gamma 7\}$ на материале тестов для сета Ф1 ÷ Ф4, коснемся вопроса о проективно инвариантных *эталонах* для них.

Поясним вычислительную схему дескриптора по 5-шаблону. Если на октете заданы пять соседствующих вершин $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, то позицию “3” можно проективно стабильно представить точкой на плоскости вурфов, используя упорядоченные квартеты $\{1, 6, 7, 4\}$ и $\{5, 6, 8, 2\}$ в качестве вурф-оценок w_1 и w_2 для них (на левой нижней врезке рис. 3 показано, как введение внутренних точек 6, 7, 8 по правилам $6 \Rightarrow 1-4 \times 2-5, 7 \Rightarrow 3-5 \times 1-4, 8 \Rightarrow 2-5 \times 1-3$ создает условия вычисления требуемых квартетов). Просканировав сетом из пяти точек все вершины описываемого октета, получим циклический граф дескриптора, “отчетливо” классифицирующий роли вершин в октете: пара $\{E, D\}$, репрезентирующая *ось*, лежит на диагонали графика, а проективно симметричные пары $\{A, B\}$, $\{I, L\}$ и $\{J, R\}$ расположились на плоскости W вурфов точно симметрично относительно диагонали ее положительного квадранта (по причине перегруженности рис. 4 схема 8-шаблона будет показана и описана в разд. 3 на примере центрально симметричного \bullet С1, однако в рамках этого раздела целесообразно продемонстрировать форму дескрипторов для \bullet типа Ф).

На рис. 5 и 6 приведены графики дескрипторов Ф1 и Ф2 соответственно (по схемам 5- и 8-шаблонов). 8-шаблонные графы, как правило, имеют на плоскости вурфов масштаб существенно мень-

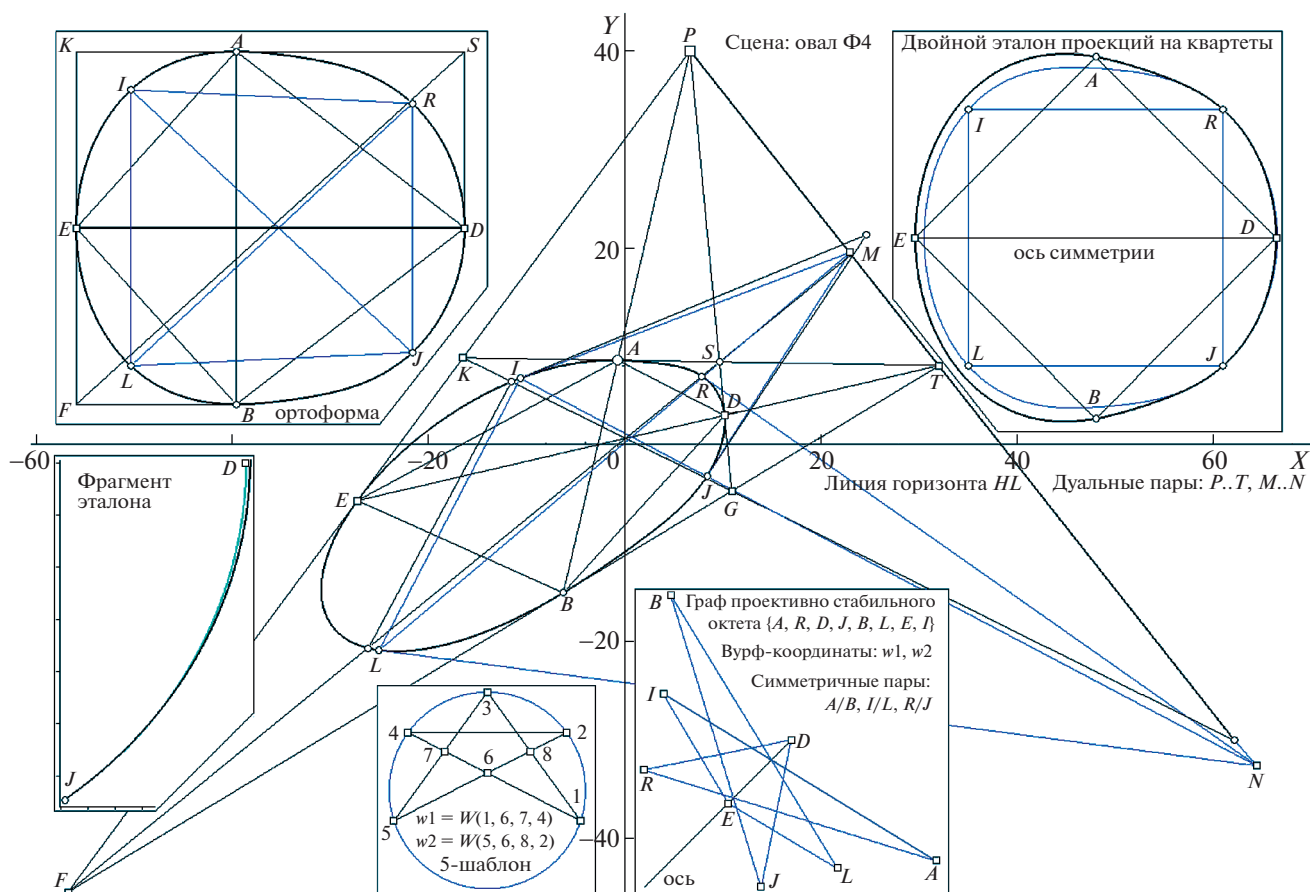


Рис. 4. Вид: двойной эталонной проекции \mathbf{o} (показана на верхней врезке справа на примере Φ_4 , давшем опровержение всех Γ), графа дескриптора Φ_4 (в версии 5-шаблона; врезка в середине внизу) и ортоформы Φ_4 , где показан гипотетический источник ошибок локализации HL по факту расхождения поляры $L-R$ и диагонали $S-F$ (верхняя врезка слева), в два цвета фиксируемый на основном поле рис. вариантами позиций для M и N . Остальные пояснения в тексте.

ший, по этой причине они изображены на рисунках в пропорционально увеличенном размере. Поэтому граф для 8-шаблона неизменно симметричен относительно диагонали плоскости вурфов в координатах (kw_1, kw_2) , где k коэффициент гомотетии, т.е. масштабирования. Для Φ_1 $k = 11.4$, он намеренно был выбран таким для “эстетичной” компоновки рис. 5, так что условие $d \equiv E$ не является законом “зависимости шаблонов”. У Φ_2 $k = 12.5$, и этот выбор обусловлен оптимизацией компоновки рис. 6. Так же как и по схеме 5-шаблона, 8-шаблонные графы строго симметричны относительно диагонали, при этом ей самой всегда инцидентны образы осевых вершин E, D . Не приведены аналогичные графики для Φ_3 – они мало отличаются от графов для Φ_2 . Рисунок 7 изображает дескриптор по 8-шаблону для “анархиста” Φ_4 . Его дублер по схеме 5-шаблона уже показан на врезке рис. 4. Осталось заметить, что *осесимметричность* подсемейства Φ характерным образом выделяет их по дескриптору в 8-шаблонной форме: все опробованные в компьютерных

тестах представители Φ имеют для графов этого шаблона строго *квадратный* фрагмент, а его вершины, ортогональные главной диагонали плоскости вурфов, являют собой образы вершин A и B , лежащих на луче из полюса симметрии P .

Осталось обсудить нововведение в части непрерывного проективно инвариантного описания \mathbf{o} , ставшее “естественным” следствием развиваемой здесь концепции “октета вершин \mathbf{o} , имманентных проективным особенностям его геометрии”. Требуется разъяснение утверждение о существенном улучшении схемы эталонного представления \mathbf{o} проекцией на “правильную” композицию ромба и квадрата (с общим для них центром и равными площадями, так что восемь их вершин принадлежат окружности, а ромб – это повернутый на 45° квадрат) в сравнении с прежней схемой, когда “вполне успешной” оценивалась инвариантная репрезентация *одного* стабильного квартета вершин \mathbf{o} на квадрат эталона. Старая схема имела известный недостаток – “низкой чувстви-

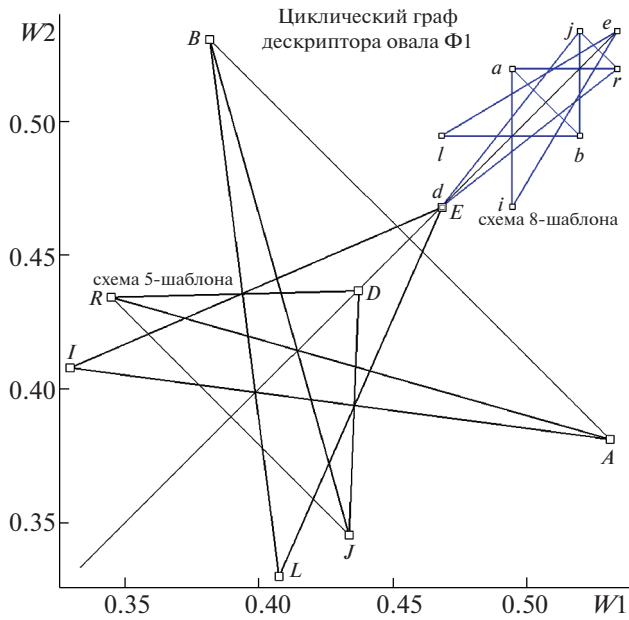


Рис. 5. Вид на W -плоскости 8-вершинного циклического графа дескриптора Φ_1 в формах 5-шаблона (черный график слева) и 8-шаблона (синий справа вверх). Пояснения в тексте.

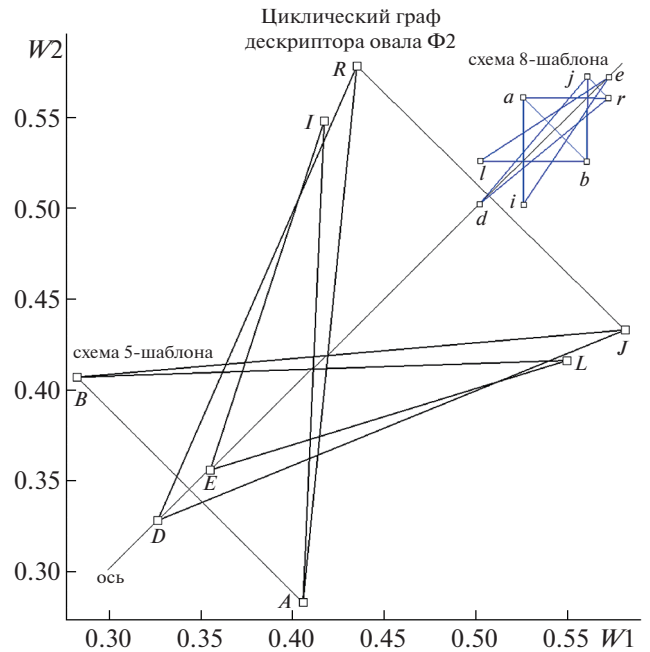


Рис. 6. Вид на W -плоскости 8-вершинного циклического графа дескриптора Φ_2 в формах 5-шаблона (черный график слева) и 8-шаблона (синий справа вверх). Пояснения в тексте.

тельности к проективным нюансам формы” сформированного эталонного описания вблизи каждой угловой точки квадрата (доходящей до нулевой – в четверке вершин). Предлагаемая нами методика этого четырежды происходящего “обнуления вариативности репрезентации” нацело лишена: будучи удвоенной, проекция на любой из вершин каждого правильного 4-вершинника имеет “дублера” на второй ветви со свободой выражения “нюанса формы” для того же (по полярному углу) участка представляемой ортоформы. И уточнение “того же участка” не является гиперболой, так как октет позиционно детерминирован двумя ДП, которые в соответствии с законами их генезиса не могут не только совпасть, но и сблизиться на HL , а стало быть, и вершины двух квартетов ($\{A, D, B, E\}$ и $\{R, J, L, I\}$), регулярно чередуясь, маркируют контур \mathbf{o} без значительных сближений, нивелирующих “информативность” репрезентации, как это с “неизбежностью свойственно” прежней манере эталонирования. Возвращаясь к рис. 4, отметим, что на крайней нижней врезке слева показан повернутый и увеличенный ($\times 2.5$) фрагмент двойного эталона для Φ_4 от образа вершины J до образа D , на котором видно расхождение “квадратной” и “ромбической” ветвей в окрестности D (ветвь с узлом D выделена лазурным цветом, чтобы расхождение ветвей было отчетливее).

Вернемся к демонстрации результатов тестирования сгенерированной четверки \mathbf{o} типа Φ на эффективность (в итоге – на целесообразность

привлечения) набора $\{\Gamma_1 \div \Gamma_7\}$. На рис. 8 приведены графики меняющейся (при последовательной смене номеров вершин \mathbf{o} для текущей точки кон-

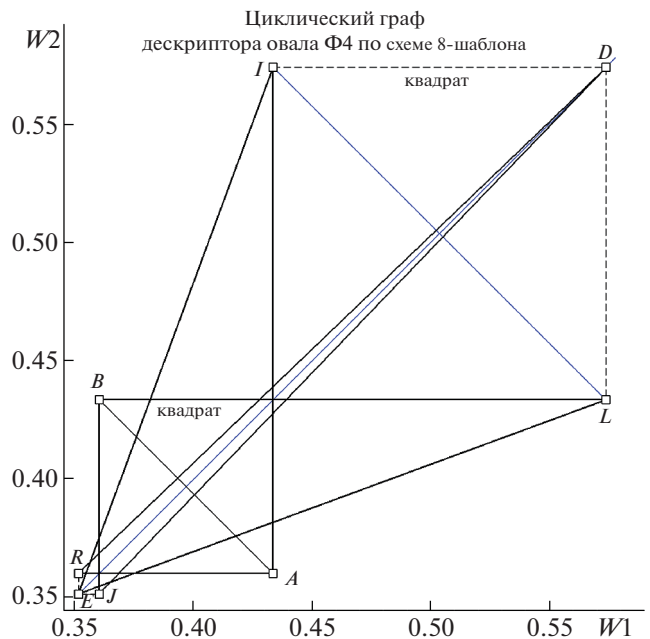


Рис. 7. Вид на W -плоскости 8-вершинного циклического графа дескриптора Φ_4 по схеме 8-шаблона. Выделены диагонали $A-B$ и $I-L$ квадратных фрагментов. Пояснения в тексте.

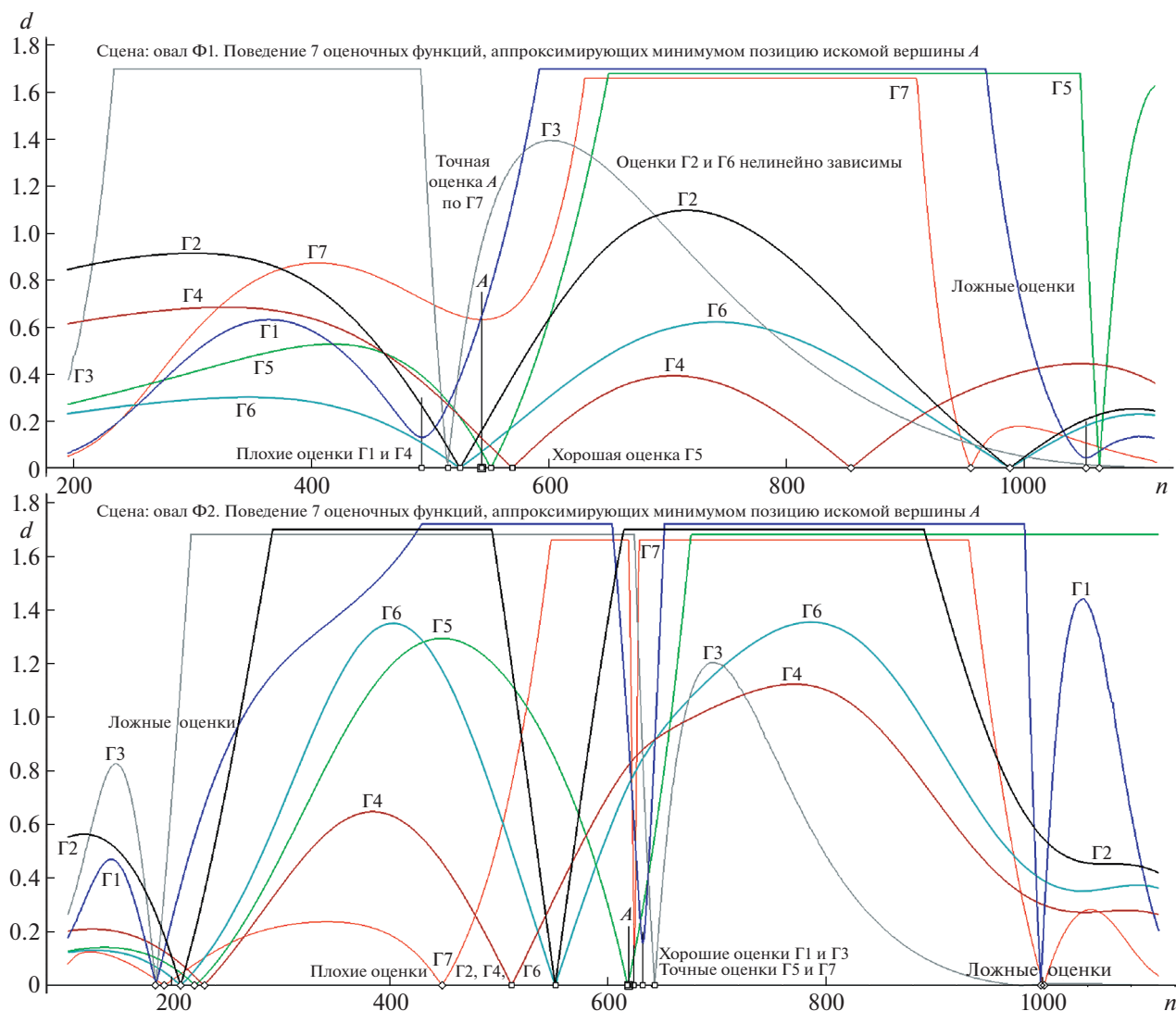


Рис. 8. Поведение функций-оценок по семи гипотезам Γ , фиксирующих эффективность Γ (через позиционную близость к целевой A) минимумом по d . Верхний блок эпюр – тесты для Φ_1 , нижний – для Φ_2 . Остальные пояснения в тексте.

тура $a(n)$) оценки расстояния между “позициями, вычисляемыми по заданной альтернативной схеме для каждой из семи Γ на роль наилучшего (в ареале своего узла) индикатора соответствия искомой позиции A для позиции HL , задаваемой априори точным ее расположением”. Для каждой из Γ формируется своя кривая, минимум ординат расстояния d которой чем ближе к заранее известному номеру “истинной” A , тем эффективнее проверяемая Γ для данного Φ (на рис. 8 верхний график отображает тесты для Φ_1 , нижний – для Φ_2). Рисунок 9 демонстрирует динамику оценок d для того же набора гипотез при обработке Φ_3 и Φ_4 . Сводка достижений: Γ_1 и Γ_3 дали хорошие оценки для Φ_2 и Φ_3 , Γ_2 , Γ_4 и Γ_6 оказались неэффективными, Γ_5 дала хорошие оценки для Φ_1 и точные – для Φ_2 , Γ_7 дала наилучшие показатели

для Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 (при массиве вершин на полупериметре в 1200 дискрет, погрешности оценок колебались от одной до четырех дискрет, т.е. не достигали уровня в полпроцента). На тестировании Φ_4 ни одна из гипотез не дала даже удовлетворительного результата. Дополнительные эксперименты показали, что дескрипторы для разнообразных Φ , вычисленные по ДП на “ошибочных” HL (хотя и принадлежащих пучку с центром P), обладают на плоскости вурфов (w_1, w_2) точно той же симметрией относительно диагонали ее положительного квадранта, так что и по свойству осевой симметрии графа “отбраковать ложные” HL не получится. Вне подхода, только и возможного для общего вида (считывать положение HL при оптической регистрации \mathbf{o} в условиях технической эксплуатации системы автоматического

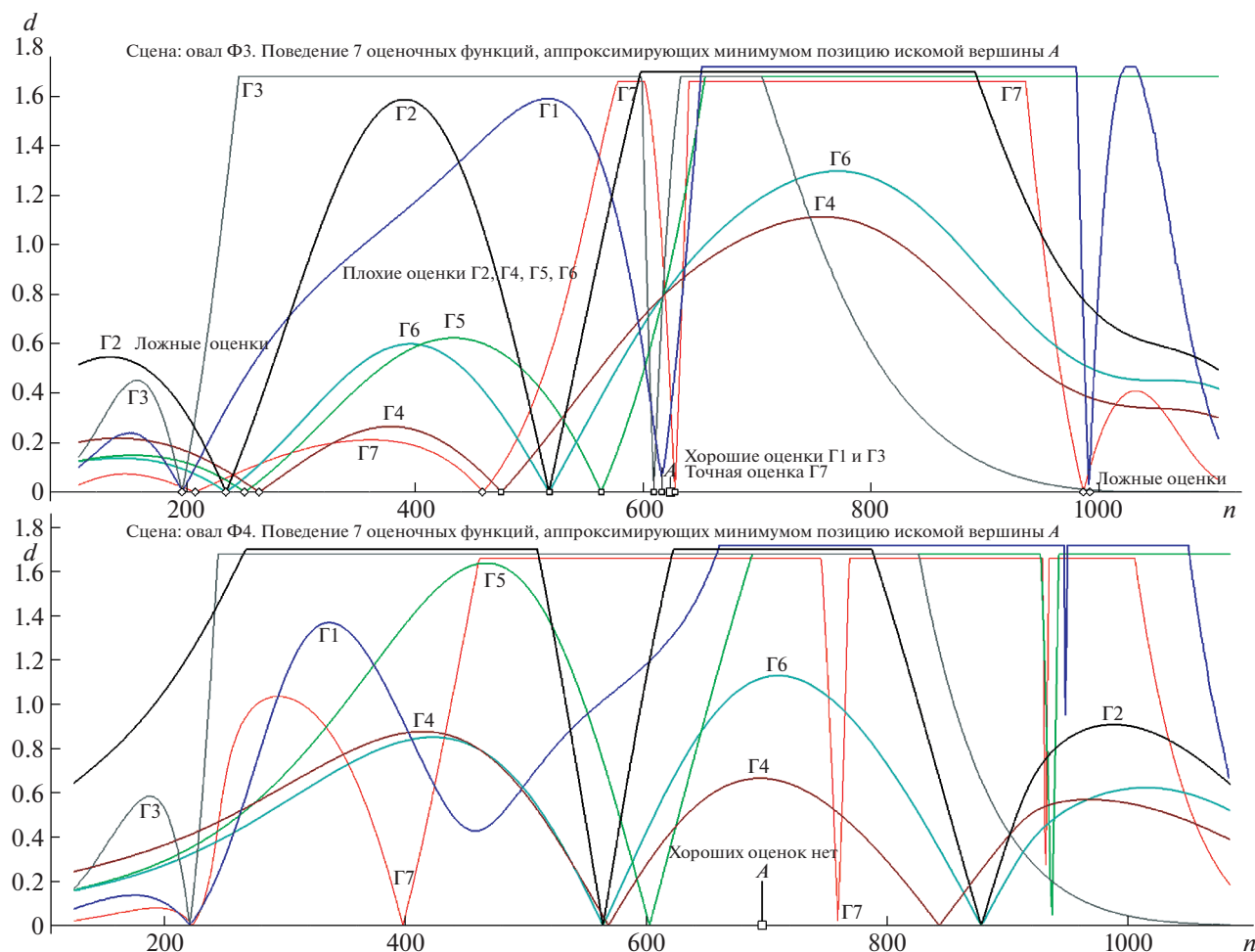


Рис. 9. Поведение функций-оценок по семи гипотезам Γ , фиксирующих эффективность Γ (через позиционную близость к целевой A) минимумом по d . Верхний блок эюр – тесты для $\Phi 3$, нижний – для $\Phi 4$. Остальные пояснения в тексте.

распознавания), остается шанс набрать статистику случаев нарушения эмпирического правила “квартет $\{R, J, L, I\}$ инцидентен диагоналям 4-вершинника $\{S, G, F, K\}$ ” (рис. 4), для “нарушивших” – попыток инвариантной обработки не производить, прочих \mathbf{o} (по типу Φ) – подвергать тесту по $\Gamma 7$.

2. НОВЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКА ЦЕНТРА O У СКРЫТОЙ РАДИАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ

Представилось целесообразным – до обсуждения метода с привлечением позиции HL в задаче поиска октета стабильных вершин у радиально симметричных \mathbf{o} – сообщить о произведенной в этой связи существенной оптимизации в схеме оценки позиции центра симметрии O , поскольку координаты O однозначно задают расположение HL , и ускорение (плюс упрощение, при увеличении точности) этапа детекции O делает более мобильной процедуру получения октета по ДП. Что-

бы уяснить суть оптимизации поиска O (нами предложены два новых метода решения этой важной задачи), логично охарактеризовать прежнюю схему поиска (Николаев, 2014), которая ныне модернизирована. Заметим, что в работе (Николаев, 2021) также был предложен и испытан универсальный алгоритм поиска O , привлекающий ДП, но отличие его в том, что природа последнего не итерационная (как в обсуждаемых процедурах с общим генезисом), а переборная, и до тех пор, пока не будет разработана (и проверена в компьютерных тестах) его итерационная версия, он не конкурентен обсуждаемому тут подходу к общей задаче.

Идейная подоплека старого и нового подходов в целом общая и различается мерой сервисной поддержки (в оценке, насколько громоздок ресурс, требуемый для проведения итерационной процедуры поиска), а их общность может быть выражена двумя тезисами, связанными с приро-

дой инструмента анализа \mathbf{o} , названного *гармоническим контуром* HC (он был предложен нами ранее, являясь для \mathbf{o} клоном H -поляры *внутренней* локализации (Николаев, 2011), и использовался для получения инвариантных вурф-отображений \mathbf{o}):

1. HC , вычисленный для центра симметрии O , представляет собой *овальную* кривую, с его вмещающим \mathbf{o} (общего вида) связанную преобразованием Ω *гомографии* (то же, что и “проективное преобразование плоскости в декартовом $3D$ пространстве”; восемь его независимых коэффициентов через решение линейной системы восьми уравнений связывают произвольный квартет вершин \mathbf{o} с идентичным квартетом на овале HC). Это *единственный* (уникальный) случай совпадающей с O позиции детерминирующего форму HC тестового полюса s , когда H - и T -поляра становятся *прямыми*, совмещенными с HL .

2. Если же тестовый полюс s , задающий HC , сдвигается из O , проективная связь HC и контура \mathbf{o} теряется, а по мере приближения s к контуру \mathbf{o} форма HC претерпевает некую регулярную деформацию (законы которой можно пытаться использовать для организации итерационной процедуры “обратной динамики”: сдвига s в направлении O).

Интуитивный отклик на сформулированные тезисы можно выразить так: для того, чтобы организовать “управляемый сдвиг s в сторону O ”, следует озаботиться созданием механизма *управления* пошаговым сдвигом s , использующим “неведомые закономерности деформации” HC . Именно этими блоками “контроля и управления сдвига” сравниваемые методы и отличаются. В старой схеме “управление и проверка” возлагались на случайным образом избранный *октет* вершин \mathbf{o} . Два новых метода привлекают для той же цели *три* (“трехточечный” метод 1) либо *четыре* вершины \mathbf{o} (“четырёхточечный” метод 2). Очень быстрая работа старого и двух новых алгоритмов имеет причиной отсутствие требования на каждом шаге итеративного процесса вычислять текущую версию овала HC : достаточно производить вурф-оценки для малого (от трех-четырех – теперь, до восьми – для прежней методики) числа квартетов на прямых, связывающих вершины HC с “точками управления” на контуре \mathbf{o} . Формулы для вурфов просты, уравнения – линейны, счет – стремителен.

Для большей внятности дальнейших комментариев обратимся к рис. 10. Общий момент имеется и у двух новых схем: на контуре \mathbf{o} случайным образом выбирается пара вершин A и B , а во внутреннем поле фигуры \mathbf{o} (на рис. 10 овал \mathbf{o} получает обозначение S) случайно выбирается стартовая позиция s . Так, на контуре S появляется третья точка C (ее положение вычисляется на пересечении луча $s-z$ с контуром S , где $z \Rightarrow t(A) \times t(B)$ (см.

эту и прочие структурные формулы на врезках, в уже знакомой нотации). Далее пути решения расходятся (а конкретика *трехточечной* схемы проста, хотя и объемна в деталях), потому сосредоточимся на **методе 1** (его функциональный узел показан в верхней врезке слева). Контурная триада $\{A, C, B\}$, благодаря наличию s , обеспечивает детекцию новой триады $\{E, D, F\}$ в пересечениях лучей $A-s, B-s, C-s$ с контуром S , а те, в свою очередь, дают возможность оценить позиции внешних P и T (где $P \Rightarrow t(F) \times t(B)$, а $T \Rightarrow t(A) \times t(E)$), что в итоге позволяет локализовать по их координатам прямую (названную “гипотеза о HL ”), на пересечениях с которой лучей $A-s, B-s$ и $C-s$ определяется тройка $\{H, R, M\}$. На трех прямых $H-E, R-F, M-D$ фиксированы теперь три коллинеарные тройки точек: $\{H, A, E\}$, $\{R, B, F\}$ и $\{M, C, D\}$. Для каждой предписано вычисление *четвертой* точки, с условием получения гармонического квартета (т.е. требуется найти позиции e, f, o , решая линейные уравнения $W(H, A, e, E) = 1$, $W(R, B, f, F) = 1$ и $W(M, C, o, D) = 1$; эти выражения вынесены в правую нижнюю врезку рис. 10). Теперь созданы все условия для завершения первого итерационного шага, поскольку сформирован треугольник “ $f-o-e$ ”, во внутреннем поле которого можно объявлять новую позицию тестового полюса s' (сдвигаемой точки; на левой маленькой врезке слева этот шаг показан как сдвиг из позиции $s(n)$ в точку $s(n+1)$). Правило для локализации нового полюса было выбрано в виде операции определения центра масс $f-o-e$. Хотя этот прием и не является проективно инвариантным переходом от $s(n)$ к $s(n+1)$, “свобода” в организации траектории по нежесткому правилу “смещаться в сторону O ” оказалась допустимой в модельных испытаниях итерационной схемы, вывода траектории к целевой O из разных стартовых позиций. На рис. 11 продемонстрирована *карта* траекторий поиска O из пяти различных стартовых позиций s (они помечены в виде начальных точек s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 для пяти траекторий, а также маркируют на врезке с изображением S фиксированные вершины A, B и центр O в едином масштабе совместно со стартовым сетом $\{s_1 \div s_5\}$), полученная нами в модельном эксперименте. Нижний график рис. 11 показывает, как для каждой из пяти траекторий менялись пошагово расстояния до O . Положение O допустимости непроективной операции (с вычислением центра масс) для “текущих $f-o-e$ ” убедительно иллюстрируют траектории из стартовых s_1 и s_2 , где “путь к O ” выглядит на начальных стадиях процесса “весьма окольным”.

Дополним идеологическую часть описания **метода 1** объяснением, почему прямая через точки P и T названа “гипотезой о HL ”. Для этого надо “мысленно перенестись” в финальную стадию процедуры поиска O . При условии, что траекто-

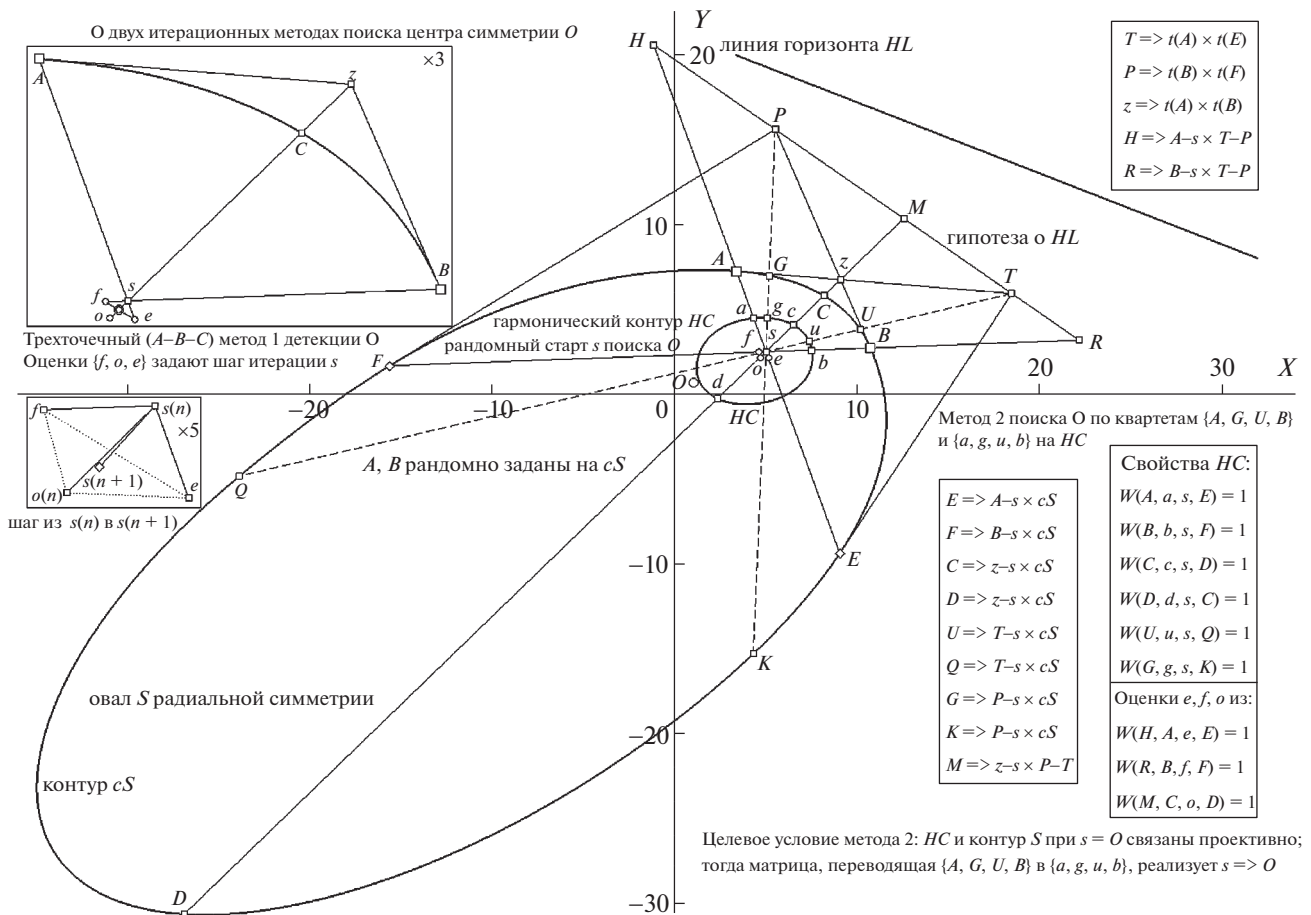


Рис. 10. О двух новых итерационных методах поиска неявного центра O у радиальной симметрии. Слева – схема организации шага итерации, сдвигающего стартовую позицию s “в сторону O ” согласно “трехточечному методу 1”. На основном поле рис. показано, как по случайно заданным A, B и s выстраивается вся композиция элементов, требуемая для сдвига s , в том числе и по HC , привлекаемому в методе 2. Комментарии в тексте.

рия привела s в O , оказываются выполненными условия, связывающие позицию центра O с положением HL : плюккерovy полярны $A-s-E$ и $B-s-F$, став в финале хордами $A-O-E$ и $B-O-F$, имеют теперь полюсами окончательные позиции P и T , действительно (по тангенциальным законам связи полюса и полярны) принадлежащие HL . По законам гармоническим (из теоремы взаимности следующим) факт своей принадлежности HL дублируют и три коллинеарных квартета $\{H, A, O, E\}$, $\{M, C, O, D\}$ и $\{R, B, O, F\}$, вурфы w для которых “обязаны приобрести” оценку $w \equiv 1$ (как и требуется для прямых пучка из O , пересекающих HL).

Целесообразен еще один комментарий принципиального характера, проясняющий необходимость сделать процесс поиска O двухстадийным (что свойственно всем здесь обсуждаемым методам – старому и новому). Процедура вычисления сдвига s имеет такую особенность: по мере приближения к цели (когда корректирующий сигнал становится все более неустойчивым, падая по амплитуде) цепь позиционных смен теряет однажды

черты “траектории”, являя “хаотическое блуждание в статичной зоне”. Подобный ареал “потери эффективности метода” на рис. 11 выделен окружностью, где в среднем после 35-го шага итераций продолжение описанной процедуры лишено функционального смысла. С этого момента надо “менять парадигму”, переходя к известной технике “уплотняемых сеток”, когда, например, для девяти точек квадратной решетки “3 × 3” по четырем направлениям (вертикаль, горизонталь и две диагонали) для трех точек (это s и пара вершин пересечения с контуром S) – по каждому из них вычисляется позиция четвертой – с целью получения гармонического вурфа (вспомним уравнение для оценки e : $W(H, A, e, E) = 1$), после чего формируется “квартет из оных четвертых точек”, для которого оценивается “степень коллинеарности” (в целевой точке O она абсолютная, позиционно принадлежа HL), узел максимальной коллинеарности объявляется центром в три раза более плотной решетки и выбор “лучшего из девяти” повторяется той же схемой. Если алгоритм перво-

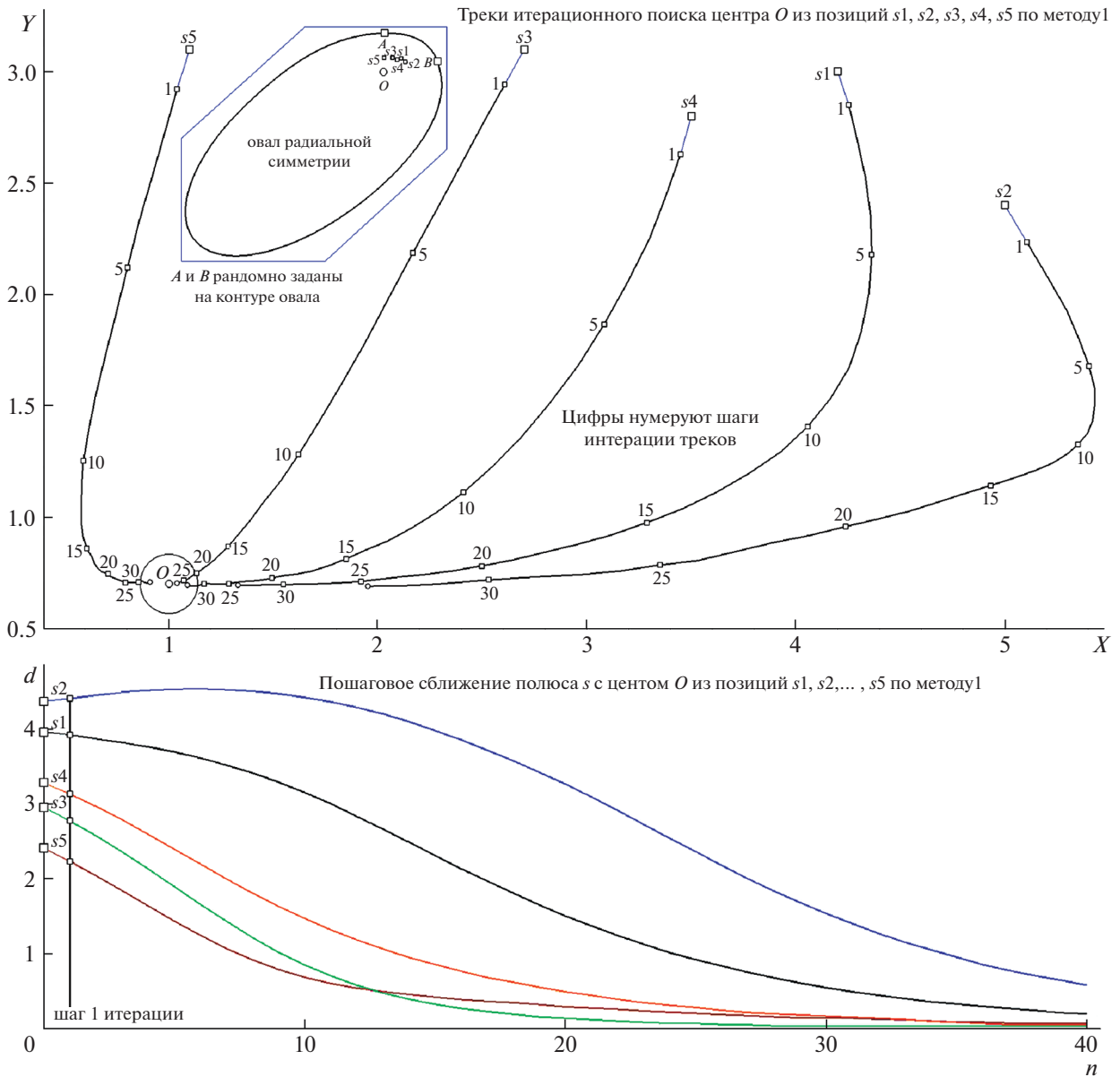


Рис. 11. Демонстрация пошаговых сдвигов (от стартовых точек s_1 – s_5) в итеративном цикле поиска O по методу 1 в модельном тесте с радиальной симметрией – с показом (врезка вверху слева) на фигуре С позиций: центра O , случайно заданных A, B и пятерки s_1 – s_5 . Нижний график изображает пошаговое сближение s_j с O . Большой окружностью (слева внизу) очерчена зона вокруг O , где эффективность методов падает. Комментарии в тексте.

го этапа мы назвали *быстрым*, то финальный – следует назвать “молниеносным” (он не требует не только формирования кривых *НС*, но и существенно менее громоздкого “вычисления по полюсу – его полярных”, где нужна оценка *касательных*, и без чего не обойтись при детекции ДП). Варианты реализаций подобных пирамидально-переборных 2D подходов (как и “схемы спуска” – для первого этапа) давно изучены и стали “классикой итерационной идеи”. Казалось важным сообщить детали организации вектора сдвига, что и делает метод 1 *новацией*. Все три ме-

тода чувствительны к выбору опорных вершин контура: неудачная их композиция по отношению к случайно зафиксированному стартовому s приводит “иногда” к спиральной траектории (либо ее финишу на контуре o). Сменить позицию s при фиксированных A и B (либо раздвинуть/сдвинуть эту пару) легче, чем варьировать композицию “октет на контуре + s ”, как это приходилось делать в старой процедуре, и дело тут не в комбинаторном навале проб, а в разы более понятной *причине* неудачи. Уже со второго-третьего перезапуска траектория “выводит” к O (для мето-

да **1** подобные ситуации были единичными в статистике проб в десятки стартов). Осталось аттестовать **метод 2** (что будет сделано максимально лаконично – по причине ясности его новационной составляющей – в сравнении с техническими нюансами работы программы).

Вернемся к образам и “мантрам” рис. 10. На контуре S фигурируют десять вершин. Из этого набора для дела понадобится компактная четверка $\{A, G, U, B\}$ (и служебная пара K, Q), из числа которых позиционные особенности еще не выявлены для $\{G, U, K, Q\}$. Их положение детерминируют на S описанные выше полюсы P и T , задавшие позиционно уточняемую “гипотезу о HL ”. Лучи $P-s$ и $T-s$ на пересечениях с S задают пары G, K и U, Q . Далее для уяснения целевой установки **метода 2** понадобятся принцип вычисления HC и основная мысль, объединяющая ранее сформулированные **тезисы 1** и **2**. Закономерности формирования HC поможет понять прочтение структурных формул из списка “Свойства HC ” (на правой врезке рис. 10), суть которых в решении уже не один раз упоминавшейся вычислительной задачи: по координатам трех коллинеарных точек (это s и пара вершин S в пересечениях с прямой, через s проходящей) найти *четвертую* при условии получения *гармонического* квартета. Тезисы ориентируют мысль двумя конструктивными аспектами. В целевой позиции поиска (в центре O) для произвольной четверки вершин S – в итоге решения линейной системы восьми уравнений, связывающих восемь ее координат (4 точки, каждая с парой координат x, y) с аналогичным набором чисел для квартета на HC , будут получены 8 коэффициентов преобразования гомографии Ω , которые свяжут любую точку плоскости S с точками плоскости HC (как если бы это были *разные* плоскости). Мобилизуем **тезисы 1, 2**. Для s , совмещенного с O , преобразование Ω точку s никуда не сместит (случай тождественного преобразования), тогда как для любого иного положения s (когда проективная связь внешнего S и внутреннего HC овалов заведомо отсутствует) коэффициенты Ω , найденные по данным проективно *независимых* квартетов на S и HC , “непрерывно сдвинут” s в направлении, обусловленном “неведомой деформацией” HC . В **методе 2** итерационные сдвиги s детерминированы коэффициентами Ω , получаемыми из уравнений связи (отсутствующей, хотя и “примерно закономерной” в части деформаций тем больших, чем ближе к контуру S форму HC задающая позиция s) между квартетами вершин $\{A, G, U, B\}$ на S и набором $\{a, g, u, b\}$ для HC . Идея подхода сформулирована “квази-математическим языком” в нижней части рис. 10 справа. Обсуждение модельной *локализации метода 2*, по мнению автора, мало соответствует тематическому профилю публикуемого издания, но на ноте “уклонения от изложения” нельзя за-

канчивать тему новаций. Пусть заключительной позитивной мыслью станет декларация: новый **метод 1**, к этапу работы с ДП на HL поставляющий найденное положение центра O , финальным “побочным” продуктом имеет *точную* диспозицию востребованной “линии горизонта”.

3. О ВЫЧИСЛЕНИИ ОКТЕТА ВЕРШИН O РАДИАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИИ

Согласно принципу дуальности плюккерových полюса и поляры и уникальной роли центра симметрии O (явного у ортоформы и скрытого – в общем случае) H -поляра для O утрачивает *криволинейность*, трансформируясь непосредственно в интересующий нас носитель ДП – в прямую HL . Для ортоформы o разновидности *радиально* симметричных (представителей семейства которых будем в этом разд. классифицировать литерой C), HL из понятного нематематикам образа “линия горизонта” (что “присуще” *общему случаю*) становится бесконечно удаленным объектом – математической абстракцией под именем “несобственная прямая проективной плоскости”. В силу этих обстоятельств вид ортоформ для фигур семьи C напрямую иллюстрирует проективные особенности своей геометрии, давая возможность использования свойства “параллельность” и облегчая “интуитивное” понимание *бесконечно удаленного* объекта HL – посредством применения гармонического описания свойств его хорд, разделяемых центром O пополам, – на языке формулы “вурф в отрезках” (вспомним Введение): $w[x, x, \infty] \equiv 1$, где фрагмент x, x и означает разделение произвольной хорды у ортоформы o на две равные половины длины x . И, поскольку этот тип симметрии (что ясно геометру априори) обеспечивает для o однозначно простую связь с HL , то не потребуются “мудреных подозрений списка Γ ”, чтобы проследить путь и идею получения октета стабильных вершин кривой C посредством локализации двух ДП на HL .

В правой части рис. 1 приведен конкретный вид двух ортоформ разновидности C (им назначены имена: $C1$ и $C2$), на материале численных экспериментов с которыми будут иллюстрированы особенности и итоги задачи проективно инвариантного распознавания фигур C по ходу поиска элементов (от ДП – через *октет* – к стабильным эталонам), эту задачу реализующих. Обсудим материал, скомпанованный на рис. 12. В правой верхней врезке в терминах плюккеровой дуальной пары “полюс, поляра” расклассифицированы для ДП $D..T$ и $H..M$ геометрические их связи, делающие отношения полюсов $\{D, T, H, M\}$ и их поляр (хорд на $C1$ через точки касания, детерминируемые полюсами) *дуальными*. В уже стандартной нотации в верхней левой врезке даны струк-

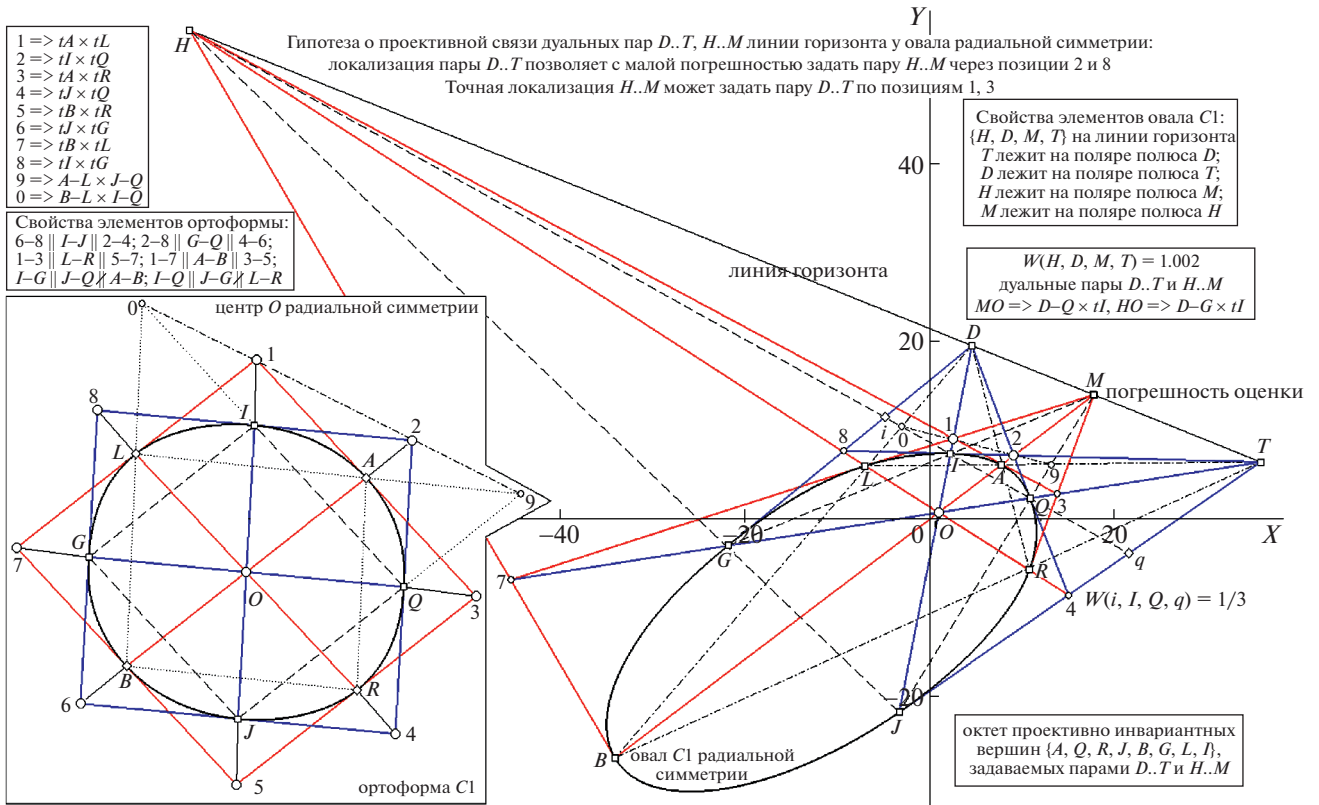


Рис. 12. Схема оценки позиций ДП на найденной HL для о $C1$ радиальной симметрии – с показом: вида его ортоформы (врезка слева внизу) с двухцветной разметкой чередующихся четвертов вершин контура, структурных формул вычисления вспомогательных элементов схемы и правил для ДП (на прочих врезках), роли позиций “1” и “3” в гипотезе связи четверта $H..M, D..T$ (основное поле, с двухцветным показом элементов, задаваемых каждой ДП, составляющих искомый октет $\{A, Q, R, J, B, G, L, I\}$). Остальные пояснения в тексте.

турные определения десятка внешних вспомогательных точек, а ниже – с привлечением свойства *параллельности* рубрицированы отношения элементов ортоформы, объединяющие триады вида “хорда и две касательных к $C1$ ” в группы, являющиеся для S общего вида проективными пучками с центром на HL . Дополнительные свойства, обнаруженные на примере $C1$, выражаются в добавлении к пучкам с центрами H, D, M, T пар хорд, не проходящих через O (а на ортоформе образующих ромб $I-Q-J-G$), дооснащающих каждый пучок в виде сета из пяти элементов (например, в D сходятся лучи $B-L, I-J, A-B$ и касательные tG, tQ). На ортоформе с большой точностью композиции 1-3-5-7, 2-4-6-8, $A-R-B-L$ и $I-Q-J-G$ образовали ромбы (параллелограммы), а четверка “0, 1, 2, 9” (где “0 $\Rightarrow B-L \times 1-2$ ”, а “9 $\Rightarrow J-Q \times 1-2$ ”) проявила свойство коллинеарности. Был замечен факт $W(i, I, Q, q) = 1/3$ ($i \Rightarrow I-Q \times t(G), q \Rightarrow I-Q \times t(J)$), для ортоформы o , свидетельствуя о равенстве трех отрезков, где средний $I-Q$, а крайние отсекаются прямыми “6-4” и “6-8”. Следует отметить важное свойство элементов ДП для o с симметрией осевой (Φ) и радиальной (C). Если

узлом ДП называть точку пересечения ее поляр, то Φ и C различаются его “поведением”: у Φ узлы двух ДП не совпадают (принадлежат оси симметрии; на рис. 3 они обозначены как O и C), тогда как у C узел O общий. Свойство совпадения узлов ДП сохраняется и у кривых Ламе (будет рассмотрено в разд. 4), “несмотря на то”, что у них имеются *оси симметрии* (числом более одной; определяющим фактором является все же *центрально симметричный характер* o).

Рисунок 12 дополнительным образом информирует на примере фигуры $C1$ о ситуации продолжающихся (начало положено o типа Φ) проверок гипотезы о позиционной связи двух ДП. Как и ранее, предположение о координатной зависимости пар формулируется в виде альтернативы: если точно вычислена пара $H..M$, то найти $D..T$ можно по положению точки “1” ($1 \Rightarrow t(A) \times t(L)$), поскольку ожидается, что $D \Rightarrow H-M \times O-1$, следовательно, локализуемы I и J , после чего окажется возможной оценка T ($T \Rightarrow t(I) \times t(J)$), тогда как при известном расположении $D..T$ пару $H..M$ может “симметричным образом” локализовать точка “2” ($2 \Rightarrow t(I) \times t(Q)$), задавая M . По координатам

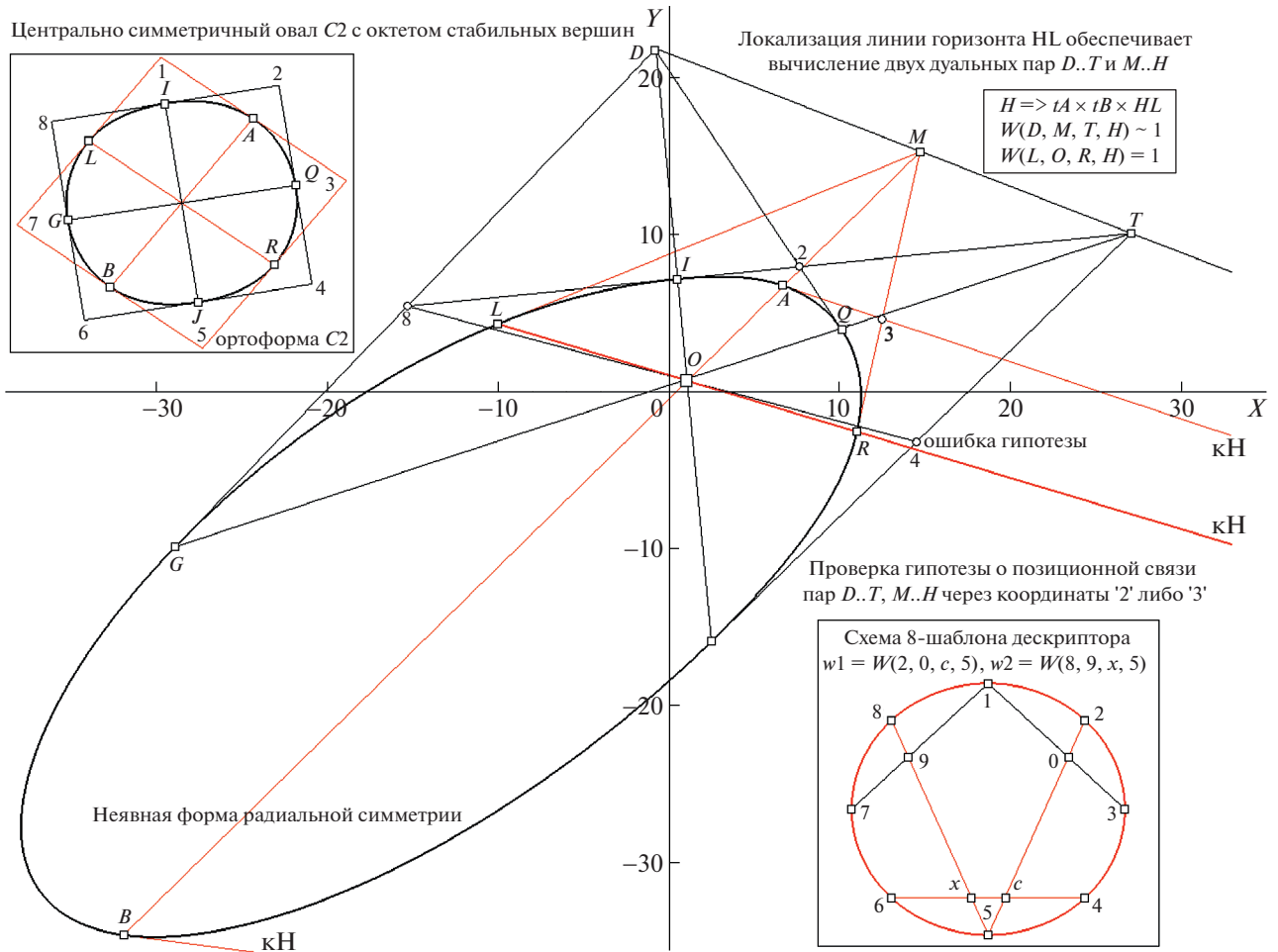


Рис. 13. Дополнительная демонстрация (на модельном о C2) причин погрешности для гипотезы связей ДП по позициям “2” либо “3” с показом: распределения вершин октета на ортоформе о (врезка слева вверху), схемы вычисления графа дескриптора о согласно 8-шаблону по восьми вершинам в цикле (врезка справа внизу). Комментарии в тексте.

натам M определяются L и R (полюс M задаст поляру $L-R$), а вслед за тем — H ($H \Rightarrow L-R \times D-T$). Этот же альтернативный тезис на средней врезке справа объединен с констатацией зафиксированной погрешности вурфа на HL для ДП: $W(H, D, M, T) = 1.002$. Сам же тезис сформулирован “косвенным” образом: $MO \Rightarrow D-Q \times t(I)$, $HO \Rightarrow D-G \times t(I)$ (где MO и HO записаны как плюккеровы поляры, лучи для которых из O фиксируются касательной в I на пересечениях с $D-Q$ и $D-G$). Ошибка в оценке вурфа на HL — из-за сдвига позиций H и M . Она — в пределах координатного шума, порождаемого неточным заданием касательных в L и R для M , а также у A и B — для H (которые вычислялись программой, сгенерировавшей рис. 12, по правилам для коник — с использованием пяти соседних вершин, где средняя — в роли точки касания). При этом для M (на рис. 12 рядом с ее меткой надпись “погрешность оценки”) в масштабе рисунка позиционная ошибка — в толщину тонкой линии (вариант печати). Итак, связь ДП (слу-

чай — $H..M$ по $D..T$) фиксирована в границах, допустимых для вывода “позиции ДП связаны”.

Неточности связанного позиционирования ДП для о C2 (рис. 13) были столь же незначительны (они намеренно нами усилены, чтобы показать источник расхождения в направлении на “далекий” полюс H (он за пределами поля рис.) в соотношении с позицией $L-R$, по которой вычислялась M . Факт неточной гармоничности квартета ДП (на верхней врезке справа) зафиксирован “формулой” $W(D, M, T, H) \sim 1$. Переходя к описанию итогов инвариантного эталонирования о типа С, имеем теперь возможность продемонстрировать схему задания 8-шаблона дескриптора о (врезка на рис. 13 внизу справа). Его особенность — в полноте данных, привлекаемых для оценки координат каждой вершины полученного октета о (весь октет привлекается 8 раз в циклической смене ролей), и в топологической симметричности композиции, реализующей оценку пары вурф-координат. Чуть подробнее (о правилах вы-

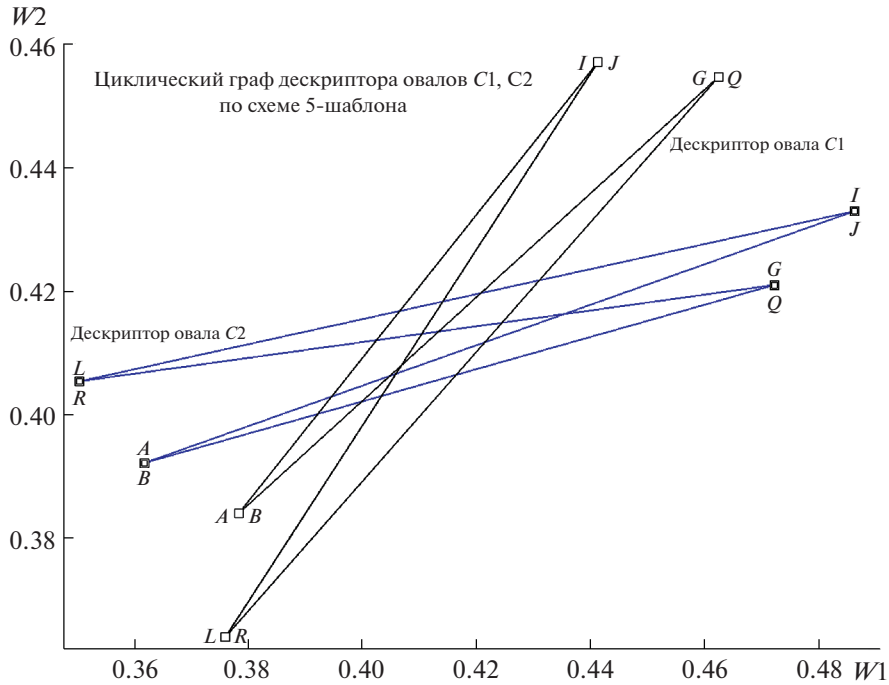


Рис. 14. Вид графа дескрипторов C1, C2 по схеме 5-шаблона, с двойной репрезентацией вершин октета в квартете вершин графа. Остальные пояснения в тексте.

числения $w1 = W(2, 0, c, 5)$ и $w2 = W(8, 9, x, 5)$ коснемся участия четырех внутренних точек $\{0, 9, x, c\}$. Они необходимы для формирования ком-

позиции из двух коллинеарных квартетов (для вычисления вурфа нужна зафиксированная четверка точек прямой): $\{2, 0, c, 5\}$ и $\{8, 9, x, 5\}$. Поэтому программа должна 8 раз пересчитать позиции дополнительных точек: $0 \Rightarrow 1-3 \times 2-5$, $9 \Rightarrow 1-7 \times 5-8$, $c \Rightarrow 4-6 \times 2-5$, $x \Rightarrow 4-6 \times 5-8$. Теперь обратимся к рис. 14 и 15, где показаны для C1 и C2 (черными и синими прямыми) графы дескрипторов обеих версий шаблонов. Свойство радиальной симметрии (даже в неявной форме ее проявления, поскольку вурфы инвариантны относительно смены коэффициентов матрицы Ω) отразилось в особенностях организации дескрипторов: все они – *двойного покрытия*, т.е. вычисляемый граф, сформировав четыре вершины, далее “идет по своим следам”. Поэтому вершины графа (для обеих схем шаблона) идентично соотносятся с парами вершин октета \mathbf{o} , радиально симметричных у C1 и C2: 4-вершинник объединяет в вершине пары: $A/B, I/J, L/R$ и G/Q . Отметим черту, общую у шаблонов обоих типов: переход от C1 к C2 сопровождается поворотом “выпуклой оболочки” графа. Для схемы 5-шаблона (при повороте) можно усмотреть и сдвиг, тогда как 4-вершинник 8-шаблонной версии при смене объекта C инвариантного описания совершает “чистый” поворот вокруг общего центра на W -плоскости (на рис. 15 это свойство показано наглядно при помощи пар тонких прямых черного и синего цветов с единым центром их пересечения), причем граф у

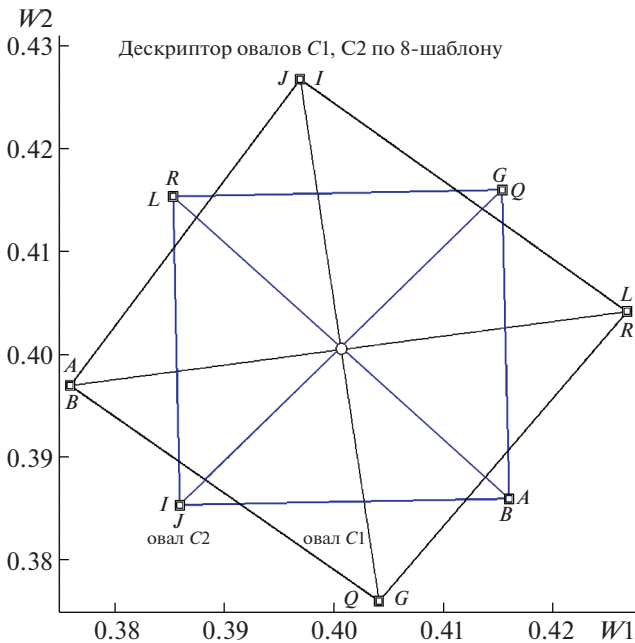


Рис. 15. Вид графа дескрипторов C1, C2 по схеме 8-шаблона, с двойной репрезентацией вершин октета в четырех вершинах графа. Остальные пояснения в тексте.

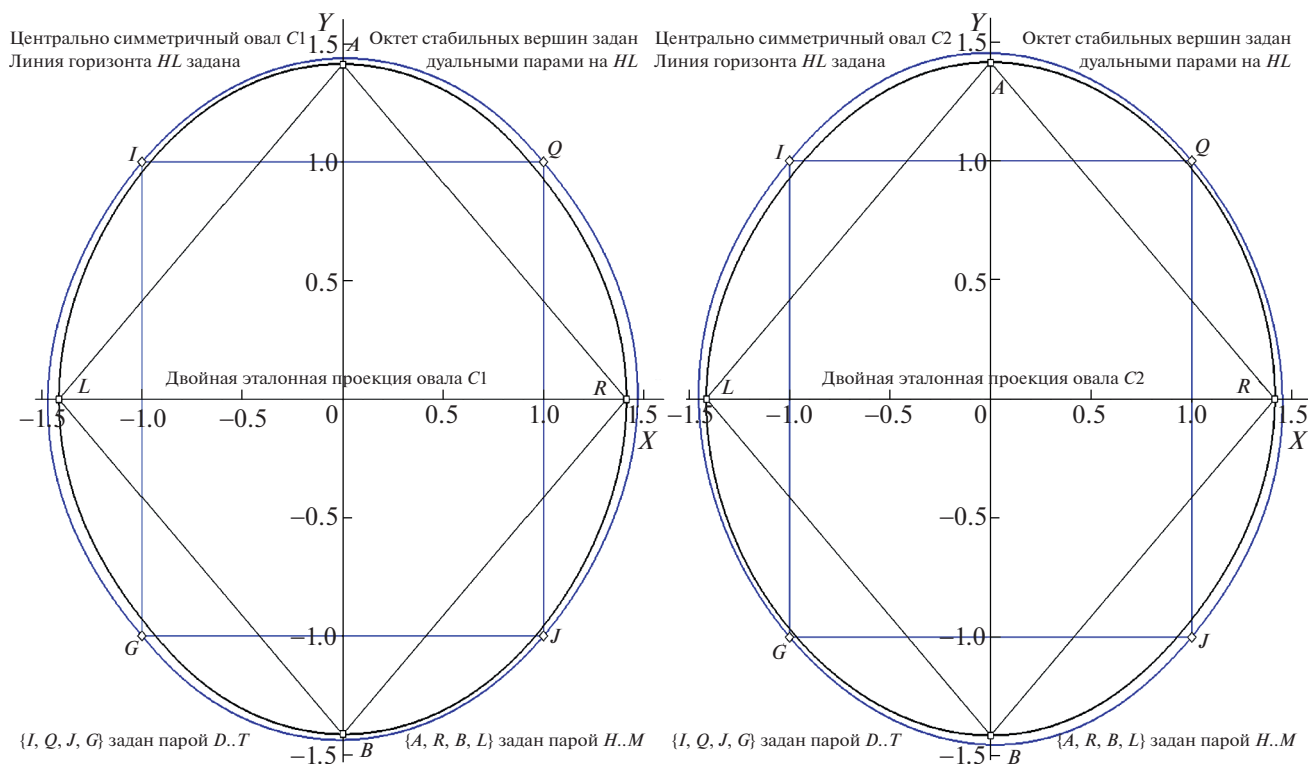


Рис. 16. Вид двойной эталонной проекции фигур C1 и C2. Остальные пояснения в тексте.

C2 это квадрат, а у дескриптора C1 форма неправильная, — это 4-вершинник общего вида.

Осталось продемонстрировать полученные (в тех же, что и ранее, компьютерных симуляциях) образцы двойных эталонных проекций для овалов C1 и C2 (рис. 16, слева — образ C1, справа — C2). Для лучшей “визуализации” свойств ДП разным цветом показаны ромб эталона {A, B, L, R}, порождаемый дуальной парой M..H, и квадрат {I, J, G, Q}, что детерминирован парой D..T. “Ромбическая” и “квадратная” ветви проекций нигде не соприкасаются (как это было у Ф4 при образе вершин J и R, см. рис. 4) и не пересекаются (как это “будет” показано в разд. 5 для o общего вида). “Комбинаторную задачу” выбора осей и вершин для дескрипторов и двойных проекций обсудим в Заключение, переходя далее к обсуждению свойств (в рамках концепции “роль ДП в детекции октета вершин o и формы его участия в инвариантной репрезентации o”) “специфического” объекта из того же семейства o, совмещающего особенности осевой и радиальной симметрии.

4. СУПЕРЭЛЛИПСЫ И КОНЦЕПЦИЯ СТАБИЛЬНЫХ ОКТЕТОВ

Рассмотрим теперь, как согласно выдвинутой концепции о роли распределения ДП на HL (в

итоге — октета вершин), детерминируемого самой геометрией кривой, проективно инвариантные ее свойства проявляются на примере популярного представителя семейства o, для которого известно (в отличие от уже рассмотренных случаев o с симметриями) аналитическое задание. В середине XX века под именем “суперэллипс” была перестроена кривая (спустя век после того, как она уже была описана Габриелем Ламе), имеющая в декартовых координатах вид $(x/a)^m + (y/b)^m = 1$, где показатель — m любое рациональное число, a и b — положительные коэффициенты; причем к семейству o имеют отношение лишь образцы, удовлетворяющие условию $m \geq 2$ (при $m < 2$ контур фигуры теряет свойства выпуклости и гладкости, следовательно, — и принадлежность к o (Савелов, 1960; Gardner, 1977)). Будем оба эти названия фигуры использовать как синонимы, отводя кривой Ламе роль ортоформы. Поскольку “формулу суперэллипса расширяли” (включив, к примеру, вид “треугольное колесо”), в нашем рассмотрении мы не выйдем за пределы формализма, подразумевающего для кривой Ламе “обобщенную трактовку эллиптических свойств” в рамках определения: фигура с четырьмя либо с двумя осями симметрии, вписываемая в прямоугольник. При $m = 2$ это эллипс (либо окружность при $a = b$), в остальных случаях — алгебраическая кривая, не имеющая индекса аналитического порядка.

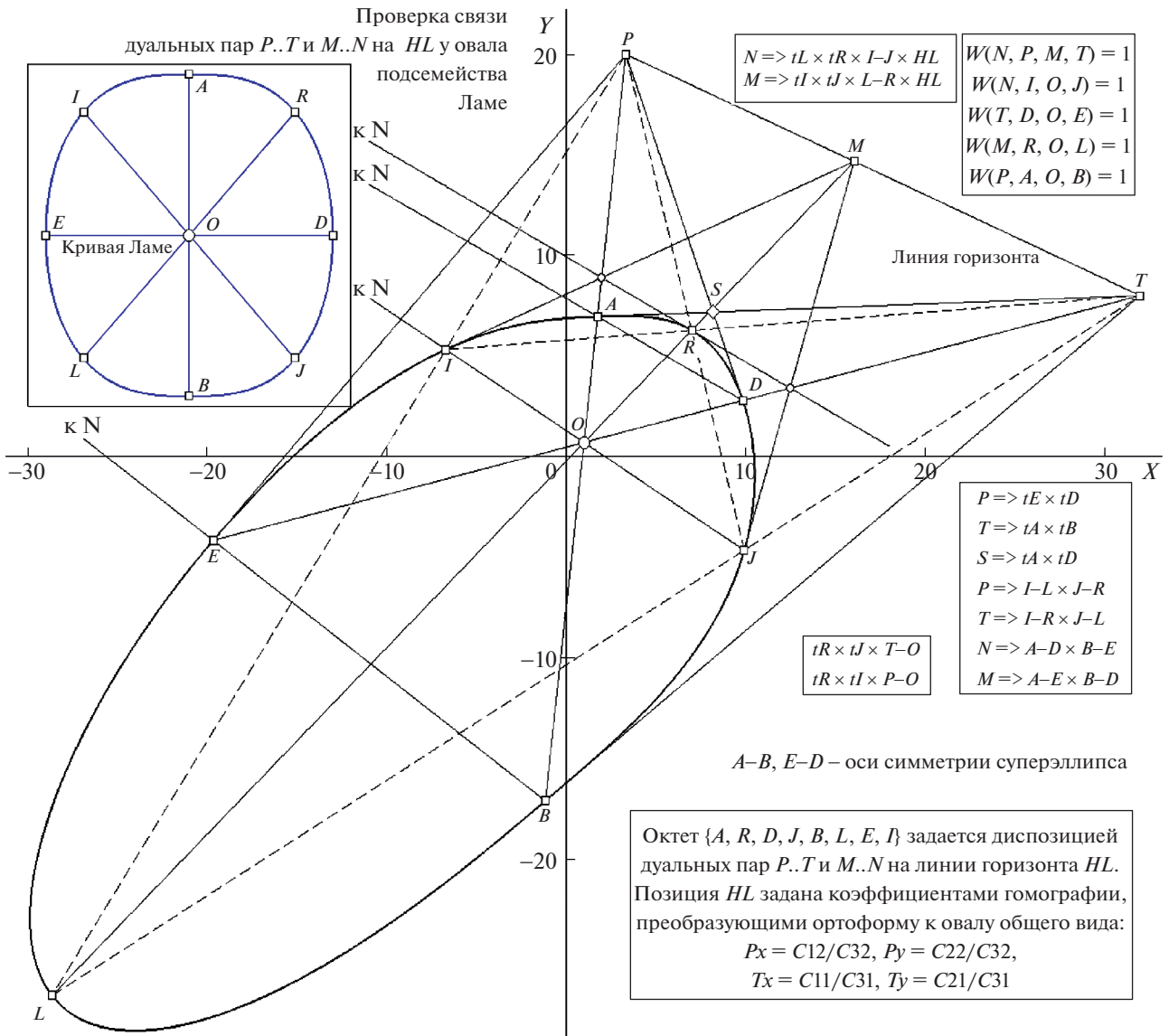


Рис. 17. Схема вычисления октета стабильных вершин $\{A, R, D, J, B, L, E, \Gamma\}$ суперэллипса, задаваемых согласно диспозиции ДП $P..T$ и $M..N$, с показом: вида ортоформы кривой Ламе с ее четырьмя полярами в роли “осей” (двухцветная врезка сверху слева), структурных формул для элементов схемы и установочных правилах для нее (на прочих врезках) и роли точки S в качестве связующей для позиций ДП на HL . Остальные пояснения в тексте.

На рис. 17 показано (ставшее уже стандартным в части правила связей между ДП, где на рис. параметрам присвоены обозначения $P..T$ и $M..N$) распределение на контуре фигуры (данный модельный образец маркирован литерой “Э”) октета $\{A, R, D, J, B, L, E, \Gamma\}$. Слева сверху на врезке предьявлена ортоформа Э с ее плюккеровыми полярами $A-B, E-D, L-R$ и $I-J$ ($L-R$ и $I-J$ это псевдо-оси симметрии). На основном поле рис. 17 в тех же обозначениях (с добавлением участка HL от P до T – в качестве неполного набора ДТ) демонстрируется вид проекции Э. Матрица преобразования Ω выбрана обеспечивающей расположение HL вблизи от Э (хотя N , как четвертая в наборе ДП, за

пределами поля рис.). Не изменилась и нотация задания определяющих точек построенной сети (все важные структурные формулы вынесены во врезки с правой стороны рис. 17, в том числе внизу показана связь канонического образа o при задании ортоформой со стандартными коэффициентами матрицы Ω , меняющими ее к общему виду).

Наличие двух осей симметрии (явных у ортоформы), а также – двух диагональных псевдоосей, в действительности являющихся “хордами разреза” в границах “поворотной симметрии” o (т.е. они должны быть классифицированы как принадлежащие виду R_2 , об этом семействе по-

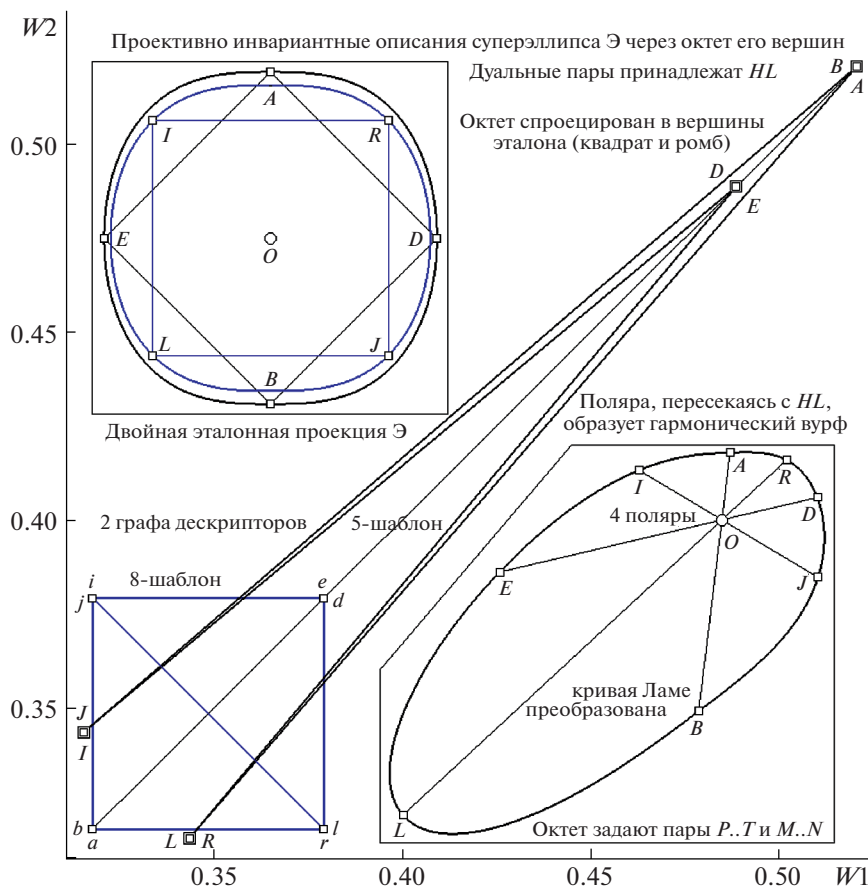


Рис. 18. Вид эталонных описаний для модельного суперэллипса Э – в форме дескриптора, по схемам шаблонов для пяти (черный график) и восьми (синий) вершин и в виде двойной проекции, с эталонами ромб (черный) и квадрат (синий), чередующимися на двух ветвях (черной и синей) позиции найденного октета (врезка вверху слева), а также демонстрация распределения октета на контуре Э (врезка внизу справа). Остальные пояснения в тексте.

дробнее будет рассказано в разд. 6; а реальные *четыре* оси кривая Ламе имеет в случае равенства параметров $a = b$), и обусловило дополнительное проявление новых “попарно симметричных” отношений у вершин октета: концевые точки осей-хорд стали полностью определяющим фактором для диспозиции октета. Дадим пример. Хорда $L-R$ симметризует на ортоформе позиции трех пар: $I-J$, $A-D$ и $B-E$, что на схеме рис. 17, как проекции общего вида для суперэллипса Э, реализовалось в выполнении правил, задающих позицию N (образующую совместно с M одну из ДП) в виде пучка трех прямых $I-J$, $A-D$, $B-E$ и двух касательных $t(L)$ и $t(R)$ (шестым элементом пучка можно считать саму HL). В пользу проверяемой гипотезы о позиционной связи ДП (из геометрических соображений ее для кривых Ламе можно считать доказанной) говорит и факт тройных пересечений, тестами подтверждаемых (в виде истинности не только симметрии *позиций* у вершин октета, но и симметризованных *направлений касательных* в них) для моделей суперэллипсов: на маленькой врезке справа подобное свойство за-

фиксировано для общей схемы в виде пары позиционных условий “ $t(R) \times t(J) \times T-O$ ” и “ $t(R) \times t(I) \times P-O$ ”, а сами эти две точки показаны на лучах $T-O$ и $P-O$ метками “малый кружок” (без литер при них).

Указанные выше обстоятельства “усиления свойств симметрии” для кривых Ламе выразительнейшим образом проявили себя через свойства графа дескриптора в варианте 8-шаблонной схемы (рис. 18). Образ графа объединил особенности “двойного покрытия” и форму ромба 4-вершинника, выявленные у *центрально симметричных* представителей σ (рис. 15), со свойством иметь “квадратный фрагмент”, присущим графу *осесимметричной* разновидности Φ (рис. 7), “монополюсно” представляя собой *квадрат двойного покрытия*, с симметричным его расположением относительно диагонали положительного квадранта W -плоскости. События на ней (при 8-кратном увеличении масштаба для графа-квадрата) отображены с указанием пар октета, совмещаемых (для обеих схем шаблона) в четырех верши-

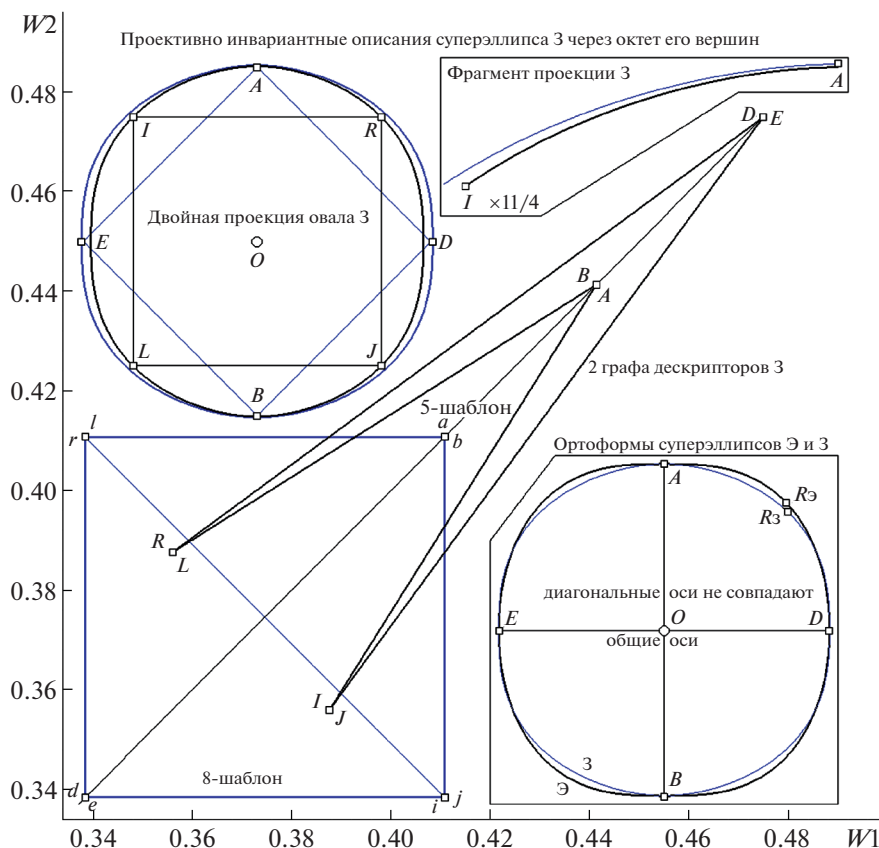


Рис. 19. Вид графа дескриптора 3 (двойного покрытия) для шаблонов с пятью (черный график) и восемью (синий) вершинами в цикле и вид для 3 двойной проекции, с эталонами ромб и квадрат (черный и синий), чередующимися на ветвях позиции найденного октета (врезка вверху слева). На врезке справа внизу – вид ортоформ Э и 3. Пояснения в тексте.

нах графа, причем для удобства визуального отслеживания вершин Э, отображаемых на графе, на врезке справа внизу показана маркировка вершин Э для проекции, общей с рис. 17. На верхней врезке слева (рис. 18) для Э (с той же разметкой) воспроизведена его “двойная эталонная проекция” (цвет ветви соответствует ромбу либо квадрату эталона). Данный вид репрезентации о сохранил проективные свойства симметрии суперэллипса: двойную осевую и радиальную (ситуация с диагональными осями обсуждается ниже).

Вторым о для иллюстрации численных экспериментов с кривыми Ламе выбрана дискретная модель 3 с меньшим степенным показателем m (т.е. ортоформа у 3 ближе к окружности, чем у Э, а сами ортоформы – с общим центром – показаны на нижней правой врезке рис. 19). Поскольку никаких неожиданностей с поиском ДП и детерминацией по ним октета не произошло (да и не предполагалось), равно как и погрешность при проверке гипотезы о позиционной связи ДП не возросла (а в среднем по серии тестов суперэллипсы проявили себя как наиболее точно следующие условиям связи – в сравнении с остальными типами “о с симметриями”), для 3 не приводится

карта поиска, аналогичная таковой для рис. 17. Так как все модельные тесты для Э и 3 проводились “по идентичной программе, но с попыткой показать различия двух избранных образцов”, то для задания 3 параметры о были выбраны таким образом, чтобы подчеркнуть нетождественность проявления осевой и радиальной симметрии. На двойных эталонных проекциях это отличие выразилось в том, что диагональные псевдо-осевые направления $L-R$ и $I-J$ не только не совпадали, но и с существенной визуальной разницей точности годились на роль осей, при этом оба образца имели идентично расположенные ортогональные оси симметрии – по $A-B$ и $E-D$. Более явственным это отличие заметно при совмещении ортоформ (врезка внизу справа на рис. 19; слово “ось” там имеет смысл псевдо-ось). В завершение темы “октеты кривых Ламе” осталось уточнить, что масштабный коэффициент для 8-шаблонного дескриптора 3 равен 8.4, а на правой верхней врезке рис. 19 показан “почти в три раза” увеличенный фрагмент двойной эталонной проекции 3 (на интервале от I до A) – для демонстрации отсутствия слияния ветвей в окрестности вершины A (что трудно различить на полной проекции). По уже

положенному материалу (за вычетом финальной фазы исследования; раздел 5 работы посвящен рассмотрению проективно инвариантных свойств **о** *общего вида*) можно сделать предварительный вывод: для **о** со свойствами *симметрии* – идея поиска (методами дискретной обработки) *октета* стабильных вершин его контура обеспечивает получение двух *новых* форм репрезентации проективно инвариантных свойств **о**, каждая из которых несет информацию, дающую *однозначно* произвести классификацию типов симметрии **о**. Переходим к рассмотрению **о**, не имеющего свойств симметрии, а потому согласно теории гладких выпуклых кривых **о** может быть приведен преобразованием Ω к любому иному **о'**.

5. ОВАЛЬНАЯ ФИГУРА ОБЩЕГО ВИДА И ДВА МЕТОДА ЕЕ ИНВАРИАНТНОЙ РЕПРЕЗЕНТАЦИИ

Ведущиеся более четверти века попытки предложить методы и схемы дискретной обработки **о** *общего вида*, приемлемые (по устойчивости, точности и вычислительным затратам) в рамках проективно инвариантного их представления в задачах автономного распознавания, не увенчались, по мнению исследователей, внушающим надежды успехом (Olver, 2001; Hann, Hickman, 2002; Musso, Nicolodi, 2009; Hoff, Olver, 2013). Громоздкость полнопереборных схем (с их неутешительной асимптотикой сложности алгоритмов), а главное, координатный шум оптической регистрации **о**, лишают проблему перспектив разрешения. Ситуацию усугубляет известный запрет на использование универсальных идей *дифференциальной* обработки, давно предложенных математиками (Картан, 1933; Faugeras, 1993), но технически нереализуемых в принципе – по причинам недостижимости требуемой точности оценок производных высокого порядка для кривой в ее задании на дискретной сетке. Описанный идейный тупик “рушит искусственный прием” расширения сценария задачи – образованием композиции “**о** + L ” либо “**о** + P ” (фиксированного при **о** задания прямой L или же точки P – для любых вариантов их расположения относительно **о**), рассмотренной в работе (Николаев, 2019). Вариант “**о** + ext L ”, согласно декларациям **теоремы 1** (см. Введение), устраняет препятствия в попытке быстро и точно организовать инвариантную репрезентацию **о** привлечением сета ДП, локализуемого на внешней L .

По причинам отсутствия возможности “извлечь данные” о диспозиции HL из самой геометрии **о**, как это предлагалось делать для *симметричных* фигур (особенности разных типов симметрии использовались, благодаря теоретически найденному способу “опоры на инвариантные их свойства”), приходится сменить подход к задаче,

сделав ее постановку с учетом реальных технических аспектов ввода изображения регистрирующей его камерой. Для аэрофотосъемок земного рельефа (методы картографии) известна задача опознавания контуров озер (Савчик, Саблина, 2018; Savchik et al., 2018), при реализации которой для серии снимков угол отклонения оптической оси от вертикали без труда трансформируется в позицию линии горизонта (при заданном направлении оси на “середину” опознаваемого озера). Контур овального озера при этом “комплектуются” диспозицией HL . Далее будем считать, что прямая HL и контур **о** образуют входную карту, и перейдем к схеме рис. 20.

На поле рис. внизу справа изображен контур овального объекта, каким бы он был на снимке при ортогональной регистрации (назовем этот ракурс “ортоформой”). Снятый не под прямым углом (к “плоскости Земли”), он приобрел вид, который уже может теперь рассматриваться в компоновке с HL (основное поле рис.). После успешной оценки сета ДП, стандартная процедура фиксирует на контуре **о** октет $\{A, R, E, I, B, L, D, J\}$, позиции которого задают граф дескриптора (для двух шаблонов; врезка слева внизу) и могут быть привлечены (через оценку матриц Ω для эталонных ромба и квадрата) для формирования *двойной проекции* **о** (двухцветная карта ветвей – на верхней врезке справа). Инвариантные репрезентации имеют особенности, отличающие их от полученных на **о** с *симметриями*: дескрипторы утратили осесимметричную форму (относительно диагонали W -плоскости), а ветви на *двойной* эталонной проекции асимметрично пересекаются. Осталось заметить, что проверка на связь ДП (на рис. 20 они обозначены как $P..T$ и $M..N$) также приобрела новый аспект, нивелирующий оценку ее достоверности: узлы каждой из ДП в “постановке общего вида” (позиции C и c) стали теперь *разнесенными*, поэтому оценки положения S уже недостаточно для задания поляры $D-S$, требуется оценка позиции c (чисто случайно лучи $S-C$ и $S-c$ оказались близки, а сама S удовлетворяла условию связи $S \Rightarrow t(I) \times t(R)$). Не собираясь усложнять гипотезу о связи ДП, отвергаем ее адекватность для *общего* случая. Разбором этого варианта геометрии **о** (в рамках применимости предложенной “концепции о стабильном октете”) мы собирались завершить изложение модельных экспериментов. Желание достичь “большой репрезентативности тестов на численных моделях” побудило добавить короткий раздел, в котором рассмотрен **о**, имеющий “особую (*вращательную*) симметрию и не требующий привнесения данных об HL ”, однако, по причине отсутствия у него на эталонных отображениях (и на ортоформе) свойств *симметрии* уже описанного нами вида (осевой либо радиальный вариант), он близок к **о**, обсуждавшемуся выше.

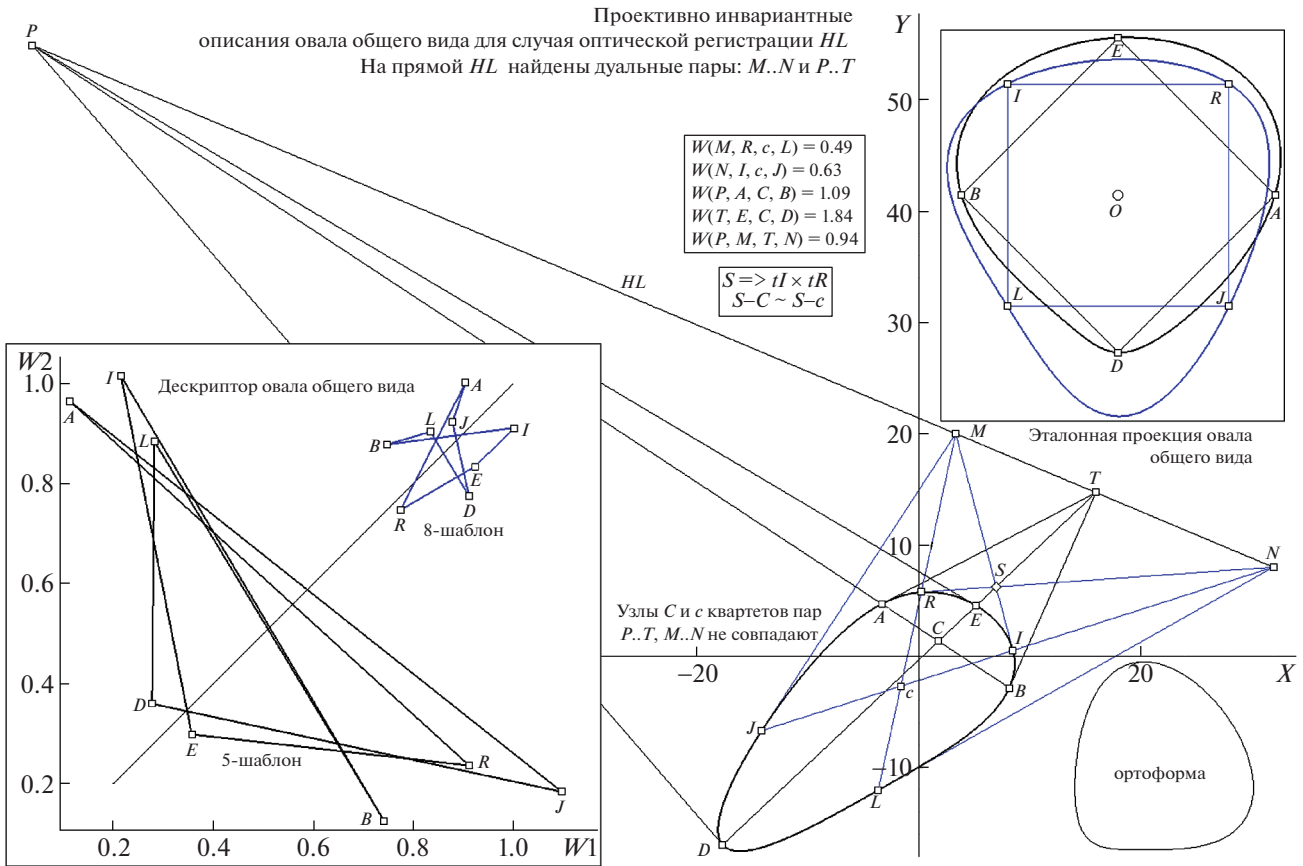


Рис. 20. Схема построений, задающих позиции стабильного октета вершин у o *общего вида*, связывающих через диспозицию HL , полученную с оптического входа регистратора, координаты ДП на ней с детерминируемым по ДП октетом. На врезках показаны: вид двойной проекции с пересекающимися ветвями (справа вверху) и граф дескриптора o в двух формах шаблона (слева внизу), оценки вурфов на полярах (и на HL), позволяющие избежать вариаций проецирования o на эталонный 8-вершинник. Разъяснения в тексте.

6. АНАЛИЗ СЦЕНЫ С ОВАЛОМ НЕЯВНОЙ ПОВОРОТНОЙ СИММЕТРИИ R_3

Фигуры, ортоформы которых обладают *поворотной* (ротационной) симметрией с нечетным индексом (когда индекс у o четный, он формально неотличим от o *радиальной* симметрии, а сам индекс n фиксирует количество идентичных фрагментов дуг, которые гладко сопрягаются, имитируя образование замкнутой фигуры “склеиванием поворотом” n раз вокруг центра O), рассмотрены в работах (Николаев, 2015а; 2017), где был описан ряд универсальных процедур (тесты по индексам n “3” и “5”) поиска неявного центра O фигуры R_n , а для $o R_3$ был предложен и испытан метод реконструкции HL по данным o позиции O . Эти алгоритмы описать лаконично (без потери вынятности изложения) вряд ли возможно, поэтому сразу же приступим к изложению деталей и выводов по данным серии модельных экспериментов с R_3 , иллюстрируя материал на примере одного из тестовых образцов (объекты R_5 не рас-

сматриваются тут по причине ограничений объема текста).

На поле рис. 21 внизу справа показана тестовая ортоформа R_3 (подобные объекты типа *сглаженный треугольник* стали ныне в компьютерной графике популярной фигурой – из клона *обобщенного семейства суперэллипсов*, и это уже не “исходная кривая Ламе”). На основном поле изображен o , гомографически трансформированный к виду с *близко* от него расположенной HL (центр O при этом приобрел столь сильный сдвиг, что визуальные особенности симметрии вращения у O уже не воспринимаются даже “приблизительно”), на которой стандартная процедура поиска фиксирует квартал позиций двух ДП (это $M..N$ и $T..P$, причём P локализуется за пределами поля рис.). Найденные ДП детерминируют для R_3 октет вершин $\{A, R, E, I, B, L, D, J\}$, позиции которых используются для *дискретного* (дескриптор в двух форматах графа; верхняя врезка справа) и *гладко непрерывного* (слева на большой врезке – двуцветная *двойная проекция*) инвариантного представления R_3 . Из

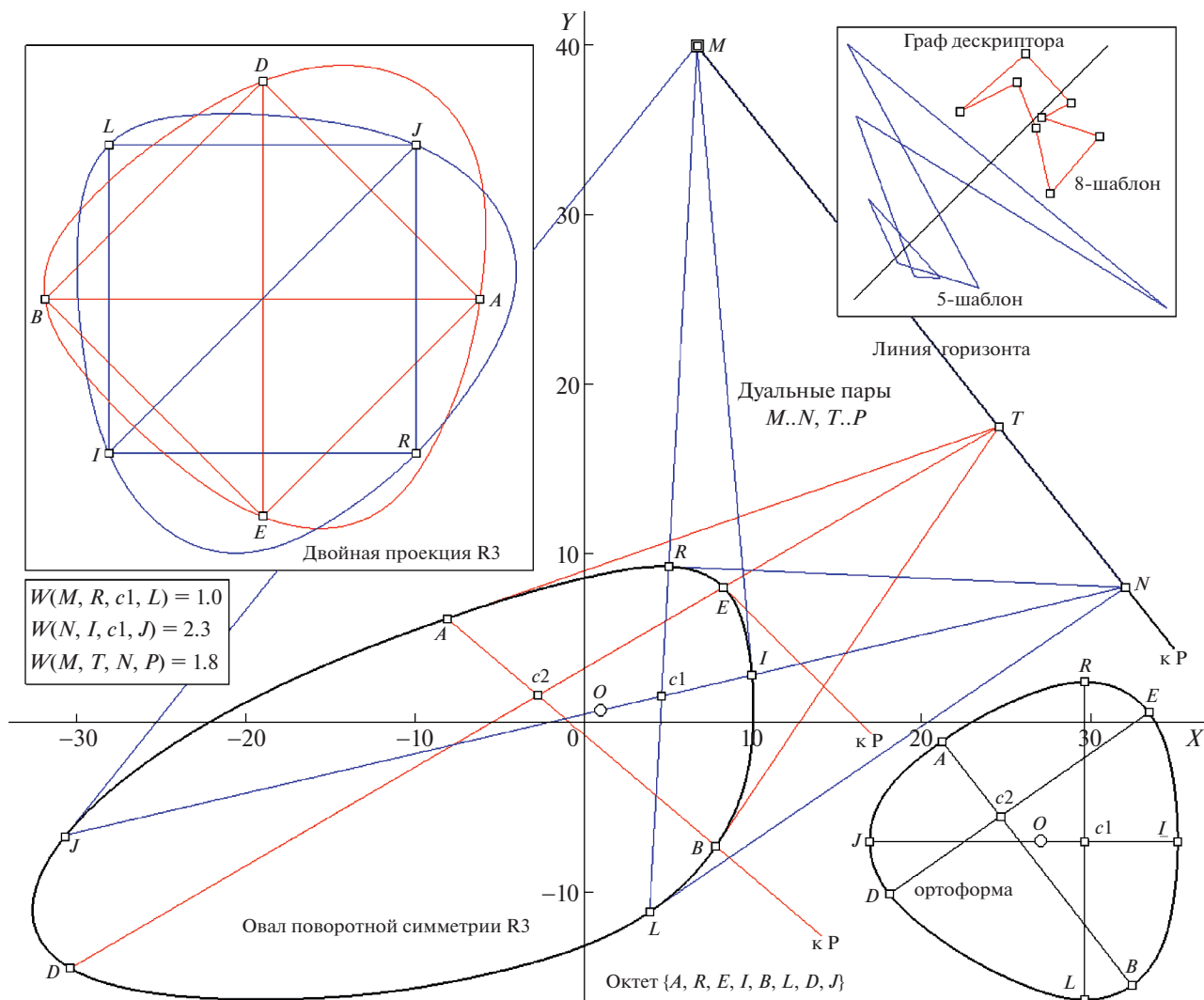


Рис. 21. Схема получения позиционных оценок стабильного октета $\{A, R, E, I, B, L, D, J\}$ вершин \bullet ротационной симметрии типа R_3 , с показом вида: ортоформы R_3 и некоторой ее трансформации под действием Ω (основное поле рис.), двойной проекции (слева сверху) и графа дескриптора R_3 (для двух форм шаблона; справа сверху). Комментарии в тексте.

числа особенностей, эмпирически уникальных (теорем на тему “вурфы ДП для HL ” автор не знает, поэтому поспешный вывод о *всеобщем* для R_3 свойстве $W(M, T, N, P) \neq 1$ “рухнет однажды у контрпримера”), можно указать на нарушаемое представителями R_3 правило: “иметь оценку вурфа для квартета точек ДП на HL , близкую к гармонической”. Хотя у R_3 симметрия *центральной* природы, она столь непрямая, что дескрипторы “являют хаос”, а двойной образ проекций стирает след правил, регуляризирующих композицию ветвей. Уже на ортоформе R_3 связь ее узлов $c1, c2$ с O “не проста”. Этими ремарками завершим раздел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из адекватных форм стабильной репрезентации \bullet ранее заявлена операция проецирования \bullet на стандартный 4-вершинник (фигуру фиксированного расположения и формы), что однозначно реализуется решением линейной системы восьми уравнений (Николаев, 2011), так как позиции проективно инвариантной четверки вершин контура \bullet можно связать с шаблоном 4-вершинного эталона, произведя проективное преобразование Ω плоскости исходного \bullet (его задают *восемь* неизвестных независимых коэффициентов) проецированием на 4-вершинник эталона, с условием совмещения найденной стабильной четверки

вершин \mathbf{o} с вершинами эталона. О слабых местах этого подхода сказано в разд. 1 (а в разд. 2 тот же прием перепроецирования на 4-вершинник об-суждается в связи со схемой “4-точечного метода 2” в итерационном процессе поиска центра O). Подчеркнем эволюцию “качества эталонирования”: схема *двойной проекции* лишена происхо-дившего (по прежней методике – в каждой вер-шине эталона,) “обнуления свободы репрезента-ции”. Будучи *удвоенной*, проекция в любой из вершин каждого эталонного 4-вершинника имеет “резерв описания нюансов формы \mathbf{o} ” для того же локуса представляемой ортоформы на парной ей ветви. Наконец, кратко о выборе для членов окте-та их позиций на “квадрате” и “ромбе”. Стандар-тизации порядка вершин у \mathbf{o} общего вида и R_n мо-гут помочь различия оценок вурфов на полярах ДП с *несовпадающими* узлами (см. рис. 20 и 21). Для аксиально симметричных \mathbf{o} диаду вершин *оси* следует проецировать на горизонталь *ромба* (рис. 4).

Во Введении была сформулирована задача проективно инвариантного описания гладких выпуклых фигур (\mathbf{o}), имеющих некие ЭС и реги-стрируемых массивом вершин в произвольном ракурсе. Такая постановка подразумевает быстрое вычисление дискретного описания (устойчи-вого к трансформирующим влияниям проектив-ного преобразования гомографии Ω плоскости \mathbf{o}) – в виде получения графа *дескриптора* (Николаев, 2016; 2019), формирование которого реализует идея *плоскостного вурфа* (Депутатов, 1926). Интере-рес к *вурфу*, как к ключевому элементу *производ-ной Шварца*, описанной более века назад, до сих пор не угас у математиков (Овсиенко, Табачни-ков, 2008). Элемент эволюции в развиваемых на-ми подходах не только в том, что плюккеровы по-ляры у ДП на HL для \mathbf{o} радиальной симметрии га-рантируют наличие признака *гармоничности вурфа* для них, а новые эталонные схемы имеют главным узлом процедур *вычисление вурфа*, но од-ним из актуальных следствий описываемой кон-цепции можно считать обеспечение однозначной типизации *особенностей симметрии \mathbf{o}* по геомет-рически проявляемым свойствам его *дескриптора* (в обеих версиях). Перед “расшифровкой *типа \mathbf{o}* – по правилам для графа” уточним: исследование проективно стабильной презентации фигур се-мейства \mathbf{o} включило немало работ, где анализиро-вались законы проявления *неявной симметрии* различных типов (Николаев, 2014; 2016; 2017; 2019), при этом в них не был предложен единый носитель=классификатор симметрий. Дескрип-тор \mathbf{o} индицирует (на плоскости W) тип симмет-рии: *аксиальной* – по 8 вершинам, где 6 “разбиты” диагональю d на пары, у \mathbf{o} симметричные, а пара *осевых* лежит на d ; *радиальной* – по четверке вер-шин *двойного* покрытия, “слившихся” симметрич-

ные пары \mathbf{o} ; у R_n и \mathbf{o} общего вида – по *беспорядку* на W .

Востребованность задач автоматического опо-знания объектов типа \mathbf{o} побуждает искать прием-лемые подходы с предложениями различных “по-луинвариантов” (Olver, 2001; Hann, Hickman, 2002; Musso, Nicolodi, 2009; Hoff, Olver, 2013). На-пример, Карлсон (Carlsson, 1996) предложил ме-тод сопоставления \mathbf{o} по пяти точкам касания впи-санного в \mathbf{o} эллипса либо по четырем точкам кас-ания к \mathbf{o} , образующим гармоническое отношение, которое можно доопределить для четырех точек на эллипсе. Следует отметить, что в этих работах схемы и методы детекции проективно устойчи-вых свойств *симметрии* выпуклой гладкой кривой не рассматриваются. Свойства симметрии плос-ких гладких фигур если и исследуются, то, как правило, это относится к кривым *заданного ана-литического порядка*. Примером можно привести исследование аспектов симметрии у алгебраиче-ских объектов *шестого* порядка (Itenberg, Iten-berg, 2004), добавив работу (Brugalle, 2007), где обсуждены свойства и особенности кривых *седь-мого* порядка. Интересны и современные работы по параметризации и нормализации кривых *ро-тационной* 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 пред-ставителей семейства \mathbf{o} .

Сформулируем выводы по рассмотренной те-ме *Привлечение ДП на HL для оценки октета про-ективно стабильных вершин \mathbf{o} , обеспечивающего ре-шение задачи эталонного описания \mathbf{o} в форме, удоб-ной для классификации типов симметрии \mathbf{o}* (плюс сепарации образцов, лишенных этого свойства). Разработаны и испытаны в сериях модельных те-стов численные методы решения задачи инвари-антного описания \mathbf{o} , не требующие расширения входного сценария заданием композиций “ $\mathbf{o} + \text{int}P$ ” либо “ $\mathbf{o} + \text{ext}L$ ”, так как декларации **теоремы 1** (\mathbf{o} ДП на $\text{ext}L$) предложено использовать для но-сителя HL в качестве объекта, диспозицию кото-рого (в плоскости \mathbf{o}) можно оценить, исходя из свойств симметрии \mathbf{o} (неявной, *центральной* при-роды). Предложенные приемы обработки кривых семейства \mathbf{o} с получением для них эталонных описаний оригинальны. Прямые и косвенные аналоги схем привлечения ДП в формирование инвариантных эталонов \mathbf{o} двух видов (дискретно-го и непрерывного) не обнаружены нами в до-ступных базах цитирования.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов 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. 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. II. Овал в композиции с дуальным элементом плоскости. *Сенсорные системы*. 2011. Т. 25. № 3. С. 245–266.
- Николаев П.П. Распознавание проективно преобразованных плоских фигур. VIII. О вычислении ансамбля ротационной корреспонденции овалов с симметрией вращения. *Сенсорные системы*. 2015а. Т. 29. № 1. С. 28–55.
- Николаев П.П. Распознавание проективно преобразованных плоских фигур. IX. Методы описания овалов с фиксированной точкой на контуре. *Сенсорные системы*, 2015б. Т. 29. № 3. С. 213–244.
- 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. XV. Методы поиска осей и центров овалов с симметриями, использующие сет дуальных пар либо триады чевиан. *Сенсорные системы*. 2021. Т. 35. № 1. С. 55–78. <https://doi.org/10.31857/S0235009221010054>
- Овсиенко И.Ю., Табачников С.Л. *Проективная дифференциальная геометрия. Старое и новое: от производной Шварца до когомологий групп диффеоморфизмов*. М. МЦНМО, 2008. 280 с.
- Савелов А.А. *Плоские кривые. Систематика, свойства, применения*. М. Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. 293 с.
- Савчик А.В., Николаев П.П. Теорема о пересечении Т-и Н-поляра. *Информационные процессы*. 2016. Т. 16. № 4. С. 430–443.
- Савчик А.В., Саблина В.А. Установление соответствия между замкнутыми контурами объектов при проективных искажениях. *Сенсорные системы*. 2018. Т. 32. № 1. С. 60–66.
- 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>
- Carlsson S. Projectively invariant decomposition and recognition of planar shapes. *International Journal of Computer Vision*. 1996. V. 17 (2). P. 193–209.
- 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.
- Gardner M. *Piet Hein’s Superellipse, Mathematical Carnival. A New Round-Up of Tantalizers and Puzzles from Scientific American*. New York. Vintage Press, 1977. 240–254 p.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Savchik A.V., Sablina V.A., Nikolaev D.P. Establishing the correspondence between closed contours of objects in images with projective distortions. *Proc. SPIE 10696, Tenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2017)*. Verikas A., Bellingham. SPIE, 2018. 1069629. P. 1–9.

Recognition of projectively transformed planar figures. XVI The octet of projectively stable vertices of the oval and new methods for its reference description using the octet

P. P. Nikolaev^{a,b,#}

^a Institute for Information Transmission Problems “Kharkevich Institute” RAS
127994 Moscow, Bolshoy Karetny per., 19, Russia

^b Smart Engines Service LLC 117312 Moscow, Prospect 60-Letiya Oktyabrya, 9, Russia

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

I propose the idea of the existence of an *octet* of projectively invariant vertices of an oval (\mathbf{o}), which are obtained under the condition of the numerical localization of an external straight line, *HL* (“horizon line”), which is fixed at the stage of optical registration of the figure \mathbf{o} or is calculated in the presence of central symmetry properties of the curve by fast algorithms searching for the center that determines the position of *HL*. The proposed idea is then illustrated by model experiments. According to the theorem on an *arbitrary* external line, *L*, composed with \mathbf{o} , the line *L* always contains at least two *pairs* of stable points (called *dual points* – DP), and each DP defines an invariant quartet of vertices on \mathbf{o} , as a result of successful positional estimation of which the contour appears to have a set of eight ordered vertices, and it is expedient to use this set for a projectively-invariant description of \mathbf{o} . Two hypotheses for *HL* are expressed and investigated in simulations: about the projective *relationship* between the positions of two DP pairs and about the possibility, for an *axially symmetric* \mathbf{o} , to estimate the position of its inherent *HL* on the basis of some projective features revealed for DP. Two novel methods for finding the center of \mathbf{o} with hidden *radial* symmetry are also described. Finally, I have proposed and tested in numerical experiments a pair of new methods for using the octet of stable contour points, found for \mathbf{o} (either symmetric or not), for a projectively-invariant description of \mathbf{o} .

Key words: oval, center and axis of symmetry, Plucker pole and polar curve, dual pairs, harmonic wurf, wurf function, descriptor, descriptor template. Lamé curve

REFERENCES

- Akimova G.P., Bogdanov D.S., Kuratov P.A. *Zadacha proektivno invariantnogo opisaniya ovalov s nejavno vyrazhennoj central'noj i osevoj simmetrijej i princip dvojstvennosti 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 invariantnyh 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).
- Glagolev N.A. *Proektivnaja geometrija* [Projective geometry]. Moscow, Vysshaja shkola [High school]. 1963. 344 p. (in Russian).
- Deputatov V.N. *K voprosu o prirode ploskostnyh vurfov* [On the nature of the plane wurf]. Matematicheskij sbornik [Mathematical collection]. 1926. V. 33 (1). P. 109–118. (in Russian).
- Kartan Je. *Metod podvizhnogo repera, teoriya nepreryvnykh 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 tekhniko-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. *Metod proektivno invariantnogo opisaniya ovalov s osevoj libo tsentral'noi simmetrijej* [A method for projectively-invariant description of ovals having axial or central symmetry]. Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2014. No. 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>
- Nikolayev P.P. *Raspoznvanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. II. Oval v kompozitsii s dual'nym 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).
- Nikolayev P.P. *Raspoznvanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. VIII. O vychislenii ansamblya rotacionnoj korrespondencii ovalov s simmetrijej vrashheniya* [Recognition of projectively transformed planar figures. VIII. On computation of the ensemble of correspondence for “rotationally symmetric” ovals]. Sensornye sistemy [Sensory systems]. 2015. V. 29 (1). P. 28–55 (in Russian).
- Nikolayev P.P. *Raspoznvanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. IX. Metody opisaniya ovalov s fiksirovannoj tochkoy na konture* [Recognition of projectively transformed planar figures. IX. Methods for description of ovals with a fixed point on the contour]. 2015. V. 29 (3). P. 213–244 (in Russian).

- Nikolayev P.P. *Raspoznavanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. X. Metody poiska okteta invariantnykh tochek kontura ovala – itog vklyucheniya 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. <https://doi.org/10.1134/S0235009219010104> (in Russian).
- Nikolaev P.P. *Raspoznavanie proektivno preobrazovannykh ploskikh figur. XV. Metody poiska osey i centrov ovalov s simmetrijami, ispol'zujushhie set dual'nyh par libo triady chevian* [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]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2021. V. 35 (1). P. 55–78. <https://doi.org/10.31857/S0235009221010054> (in Russian).
- 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).
- Savelov A.A. *Ploskie krivye. Sistematika, svojstva, primeneniya* [Flat curves. Systematics, properties, applications]. M. Gos. izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury [Moscow. State publishing house of physical and mathematical literature], 1960. 293 p. (in Russian).
- Savchik A.V., Nikolaev P.P. *Teorema o peresechenii T- i H-poljar* [The Theorem of T- and H- Polars Intersections Count]. *Informacion-nye process* [Information processes]. 2016. V. 16 (4). P. 430–443 (in Russian).
- Savchik A.V., Sablina V.A. *Finding the correspondence between closed curves under projective distortions* [Ustanovlenie sootvetstviya mezhdru zamknutymi konturami ob#ektov pri proektivnyh iskazhenijah]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2018. V. 32 (1). P. 60–66 (in Russian).
- 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>.
- Carlsson S. Projectively invariant decomposition and recognition of planar shapes. *International Journal of Computer Vision*. 1996. V. 17 (2). P. 193–209.
- 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.
- Gardner M. *Piet Hein's Superellipse, Mathematical Carnival. A New Round-Up of Tantalizers and Puzzles from Scientific American*. New York. Vintage Press, 1977. 240–254 p.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- Savchik A.V., Sablina V.A., Nikolaev D.P. Establishing the correspondence between closed contours of objects in images with projective distortions. *Proc. SPIE 10696, Tenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2017)*. Verikas A., Bellingham. SPIE, 2018. 1069629. P. 1–9.

УЧЕТ ГЕТЕРОСКЕДАСТИЧНОСТИ В ИЗМЕРЯЕМЫХ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЯХ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГЕБРАИЧЕСКОГО ПОДХОДА В ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

© 2022 г. М. В. Чукалина^{1,2,*}, А. С. Ингачева^{2,3}, А. В. Бузмаков^{1,2}, И. В. Якимчук⁴,
И. А. Варфоломеев⁴, П. А. Кулагин⁵, Д. П. Николаев^{2,3}

¹ ФНИЦ Кристаллография и фотоника, 119333 Москва, Ленинский проспект, 59, Россия

² Смарт Энджинс Сервис, 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, 9, Россия

³ Институт проблем передачи информации РАН, 127051 Москва, Большой каретный пер., 19, Россия

⁴ Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже,
125171 Москва, Ленинградское шоссе, д.16 А, стр. 3, Россия

⁵ Московский физико-технический институт, 141707 Долгопрудный, Институтский пер, 9, Россия

*E-mail: chukalinamarina@gmail.com

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

После доработки 29.10.2021 г.

Принята к публикации 09.11.2021 г.

Метод компьютерной томографии, являясь неразрушающим методом искусственного интеллекта, позволяет восстанавливать внутреннюю морфологическую структуру объектов по набору зарегистрированных под разными углами проекций. Объект зондируется рентгеновским излучением, которое при прохождении через него ослабляется. Ослабленное излучение регистрируется позиционно чувствительным детектором. Время экспозиции является важным параметром измерительной системы и наряду с поглощающими свойствами самого образца определяет вероятностные характеристики регистрируемых величин. Статистическая модель формирования сигнала в ячейке детектора базируется на распределении Пуассона, поэтому, чем меньше значение регистрируемого сигнала, тем больше его дисперсия, т.е. значения гетероскедастичны. Гетероскедастичность порождает на восстановленных изображениях искажения, которые мешают правильной интерпретации получаемых результатов. В данной работе предлагается метод реконструкции, базирующийся на алгебраическом подходе, основная идея которого состоит в добавлении матрицы “доверия” в решаемую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Матрица рассчитывается на основе результатов анализа дисперсии зарегистрированных сигналов. Выписан шаг градиентного метода оптимизации, используемого для решения СЛАУ. Результаты экспериментов на синтетических данных показывают увеличение точности реконструкции при учете гетероскедастичности.

Ключевые слова: рентгеновская томография, метод искусственного интеллекта, методы реконструкции, гетероскедастичность

DOI: 10.31857/S0235009222010036

ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская томография — это метод восстановления внутренней морфологической структуры объекта по набору его рентгеновских изображений (проекций) (Withers et al., 2021; Arlazarov et al., 2021). Современные томографические комплексы востребованы во многих областях человеческой жизни, начиная с медицины, где в отделении кардиологии изучаются проблемы самой важной для человека динамической системы (Sartini et al., 2017), и заканчивая исследованиями динамики поведения наноматериалов, применяемых для создания новейших возобнов-

ляемых источников энергии (Pietsch, Wood, 2017). Для реконструкции изображений из собранных томографами проекций применяются разные группы методов, различающиеся по быстродействию (Agulleiro, Fernandez, 2011; Saha et al., 2012), требованиям к используемому вычислительным ресурсам (Inoue, 2016), устойчивостью к наличию шума в проекциях (Balasubramani, 2021). По существу, эти комплексы превращаются, а где-то уже и превратились в реальные системы с искусственным интеллектом, в которых выбор метода реконструкции осуществляется автоматически. Несмотря на большое количество существующих

подходов к реконструкции, работы по созданию новых не прекращаются. Это связано с несколькими причинами. Жесткие требования к дозовой нагрузке диктуют появление схем сбора проекций с критически малым числом ракурсов или малой экспозицией. Увеличение пространственного разрешения понижает уровень сигнала, регистрируемого ячейкой позиционно-чувствительного детектора, что, соответственно, ведет к сильному ухудшению отношения сигнал-шум на проекциях (Grigoriev et al., 2021). Создание автоматических систем классификации (Гладилин и др., 2014) результатов реконструкции задает высокие требования к качеству реконструкции. Не все методы способны работать в таких жестких условиях.

В данной работе предлагается новый подход к реконструкции. Регистрация рентгеновских квантов, попадающих в ячейку позиционно-чувствительного детектора за время экспозиции, является стохастическим процессом и описывается распределением Пуассона (Lasio et al., 2007). Дисперсия сигнала в каждом пикселе детектора зависит от математического ожидания сигнала в этом пикселе, т.е. значения гетероскедастичны. Модификация алгебраического подхода к томографической реконструкции, в который добавлен учет гетероскедастичности в виде дополнительного множителя – “доверительной матрицы”, описана в данной статье.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Вычисление дисперсии линейризованных зарегистрированных значений

В компьютерной томографии при зондировании монохроматическим излучением регистрируемое пикселем детектора значение I_1 формируется потоком рентгеновских квантов, прошедших через исследуемый объект в направлении “источник-детектор” l за определенное время экспозиции, и описывается следующим выражением (Kak, Slaney, 1988):

$$I_1 = I_0 \int -\mu(l) dl. \quad (1)$$

Здесь I_0 – число квантов зонда, μ – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения используемой длины волны материалом объекта. После регистрации текущей проекции объект поворачивается на некоторый угол, называемый проекционным углом, и снимается следующая проекция. Процедура сбора проекций может быть организована с использованием вращающейся вокруг объекта системы “источник-детектор”, что не меняет математической модели формирования сигнала. Результатом решения задачи томографической реконструкции является рассчитанное по набору зарегистрированных

проекций пространственное распределение линейного коэффициента ослабления.

Процесс регистрации, являясь стохастическим процессом, может быть описан распределением Пуассона с плотностью вероятности:

$$p(I_1 = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad (2)$$

где математическое ожидание, равное дисперсии, описывается параметром λ . Чтобы решить задачу реконструкции, т.е. восстановить распределение μ , первым этапом необходимо линеаризовать задачу (1):

$$y = \ln(I_0) - \ln(I_1). \quad (3)$$

Здесь y – случайная величина.

Без ограничения описанного далее метода рассмотрим 2D случай задачи реконструкции, т.е. будем говорить о реконструкции одного сечения объекта, причем в параллельной или веерной геометрии были собраны томографические проекции принципиального значения не имеет. В алгебраическом подходе к реконструкции дискретизация задачи проводится на первом этапе ее решения, интеграл заменяется суммированием, формируя СЛАУ вида

$$Ax = y. \quad (4)$$

Здесь A – так называемая проекционная матрица, размер которой равен $N \times M$, где $N = n \times n$ – количество пикселей восстанавливаемого объема x , M – число проекционных углов. Обратим внимание, что x – оценка линейного коэффициента ослабления. Компоненты вектора y – значения, зарегистрированные всеми ячейками детектора для всех проекционных углов.

Сведем решение СЛАУ к решению оптимизационной задачи следующего вида:

$$\|Ax - y\|_2 \xrightarrow{x} \min. \quad (5)$$

Поскольку значение y есть результат монотонного преобразования I_1 (3), то функция вероятности дискретных случайных величин не меняется относительно используемой для регистрируемых значений. Тогда математическое ожидание рассчитывается согласно выражению:

$$M = \sum_{i=1}^{\infty} y_i p_i, \quad (6)$$

где индекс i указывает на реализацию случайной величины. Подставляя в явном виде выражение для плотности вероятности, выпишем выражение для математического ожидания

$$M = \sum_{i=1}^{\infty} (\ln(I_0) - \ln(k_i)) \frac{\lambda^{k_i} e^{-\lambda}}{k_i!} \quad (7)$$

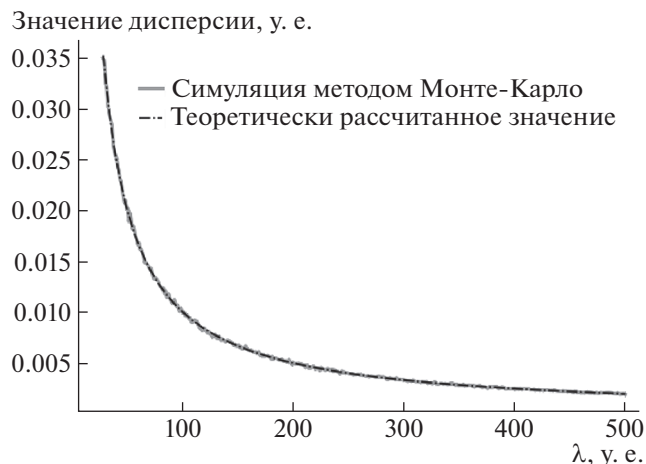


Рис. 1. Сравнение теоретического результата с результатом моделирования.

и выражение для дисперсии

$$D = \sum_{i=1}^{\infty} (\ln(I_0) - \ln(k_i) - M)^2 \frac{\lambda^{k_i} e^{-\lambda}}{k_i!}. \quad (8)$$

Найти сумму ряда как для математического ожидания, так и для дисперсии аналитически не удастся, поэтому предлагается для поиска значений математического ожидания и дисперсии численно рассчитывать суммы рядов до N -го члена, где N достаточно велико.

На рис. 1 приведены результаты расчета. Результат расчета, проведенного согласно (8), представлен штриховой линией. Результат расчета с использованием генератора случайных величин (СВ) — серая кривая. В качестве генератора СВ использовался генератор для распределения Пуассона `numpy.random.poisson (lam=i, size=5000)`. Модельные расчеты проводились для значений в интервале от 30 до 500 с шагом 0.5. Для каждого значения было сгенерировано 5000 значений.

Визуальное сравнение кривых позволяет сделать вывод о корректности выбранного приближения. Чтобы учесть свойство гетероскедастичности наблюдений при решении задачи реконструкции, припишем вес, равный обратному среднеквадратическому отклонению (корень из дисперсии) каждому наблюдаемому значению:

$$y^* = y \circ \frac{1}{\sqrt{D}}. \quad (9)$$

Здесь $\frac{1}{\sqrt{D}}$ — вектор обратного среднеквадратического отклонения, \circ — оператор поэлементного умножения. Тогда СЛАУ (4) переписывается в следующем виде

$$\frac{1}{\sqrt{D}} \circ Ax = y^*, \quad (10)$$

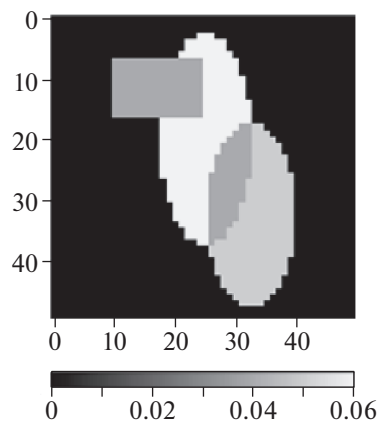


Рис. 2. Изображение фантома, использованное в экспериментах.

и оптимизационная задача будет переформулирована как

$$F = \left\| \frac{1}{\sqrt{D}} \circ Ax - y^* \right\|_2 \xrightarrow{x} \min. \quad (11)$$

Для ее решения воспользуемся методом наискорейшего спуска. После выписывания в явном виде градиента минимизируемого функционала

$$\nabla F = 2A^T \left(\frac{1}{\sqrt{D}} \circ \left[\frac{1}{\sqrt{D}} \circ Ax - y^* \right] \right), \quad (12)$$

стало возможным записать шаг $k + 1$ -й итерации метода

$$x_{k+1} = x_k - \gamma_k \nabla F(x_k), \quad (13)$$

где γ_k — это шаг спуска. Оптимальное значение шага рассчитывается одним из методов решения оптимизационной задачи

$$\gamma_k = \arg \min(x_k - \gamma \nabla F(x_k)), \quad (14)$$

например, (Коднянко, 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ

Примеры работы на модельных данных

Чтобы проиллюстрировать работу предложенного метода, проведены расчеты с использованием изображения фантома размером 50×50 пикселей (рис. 2), промоделировав несколько ситуаций, возникающих в ходе измерений.

Первый проведенный эксперимент моделирует ситуацию, в которой время экспозиции (время регистрации одной проекции) различалось для первой и второй половины проекционных данных. На рис. 3, а представлена синопграмма, рассчитанная с учетом различающегося времени экспозиции. Иллюстрация границы раздела времен экспозиции представлена картой распределения значений величины обратного стандартного отклонения (б). Значения на карте равны 10.0 в

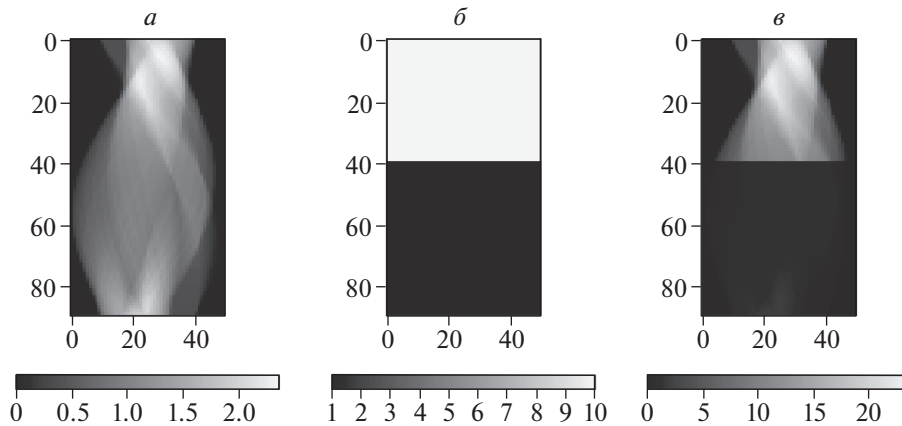


Рис. 3. *a* – синограмма с переменным временем экспозиции; *b* – иллюстрация границы раздела времен экспозиции; *v* – взвешенные значения синограммы.

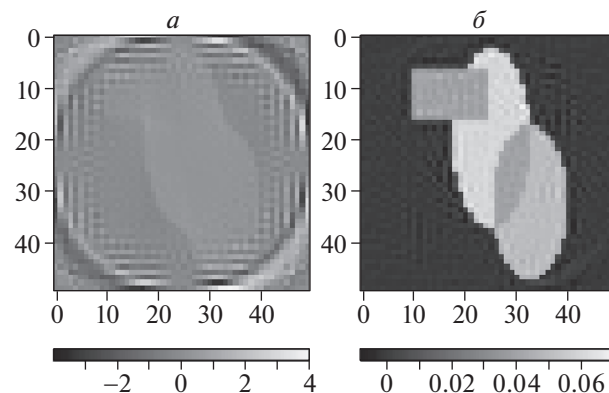


Рис. 4. *a* – результат реконструкции методом SIRT и *b* – предложенным методом.

первой половине синограммы и 1.0 – во второй половине соответственно. Взвешенные значения синограммы, используемые в записи СЛАУ, представлены на (*v*).

Томографическая реконструкция выполнялась двумя алгебраическими методами: методом SIRT (Gilbert, 1972) (рис. 4, *a*) и предложенным методом с учетом гетероскедастичности (*b*). Итерационный процесс был остановлен после 100 итераций.

Среднеквадратическое отклонение результата реконструкции от использованного для расчета проекций фантома при реконструкции методом SIRT составило $6.8E-1$, при реконструкции описанным методом – $4.4E-6$. Значения различаются на три порядка и визуально это хорошо видно (рис. 4).

Второй пример иллюстрирует ситуацию, в которой сбой отклика детектора случился при одном из проекционных углов. На рис. 5, *a* представлена модельная синограмма, на (*b*) – распределение стандартного отклонения и на (*v*) –

взвешенные значения синограммы, используемые при реконструкции предлагаемым методом.

Для реконструкции были использованы SIRT (рис. 6, *a*) и предлагаемый новый метод (*b*). Итерационный процесс был остановлен после 100 итераций.

Среднеквадратическое отклонение от фантома при реконструкции методом SIRT составило $2.4E-4$, при реконструкции описанным методом – $1.6E-6$. По-прежнему визуальное различие результатов велико.

Рассмотрим поведение предлагаемого к реконструкции подхода в ситуации, когда к значениям идеальной синограммы добавлен нормально распределенный аддитивный шум (рис. 7, *a*). Карта дисперсии различается для верхней и нижней половин изображения (*b*). На (*v*) представлены откорректированные значения синограммы, используемые в СЛАУ.

Результаты реконструкции методом SIRT (рис. 8, *a*) и предлагаемым методом (*b*) приведены ниже. Итерационный процесс остановлен после

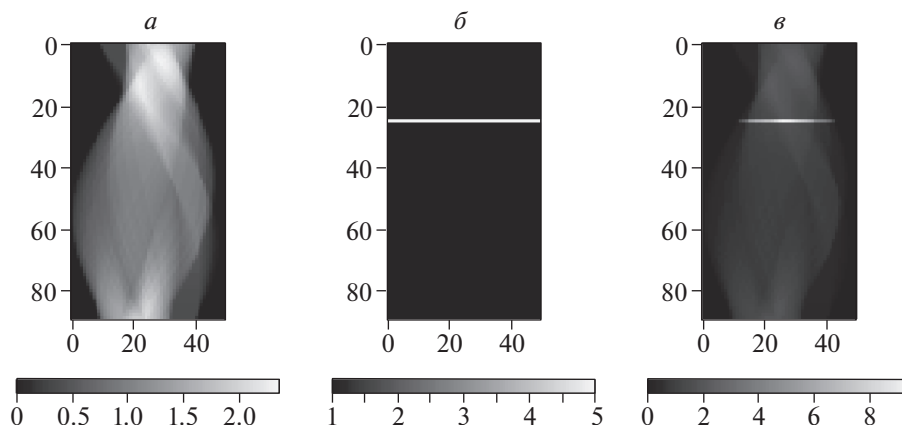


Рис. 5. *a* – модельная синограмма; *б* – иллюстрация процесса сбоя в детектировании; *в* – использованная в СЛАУ синограмма.

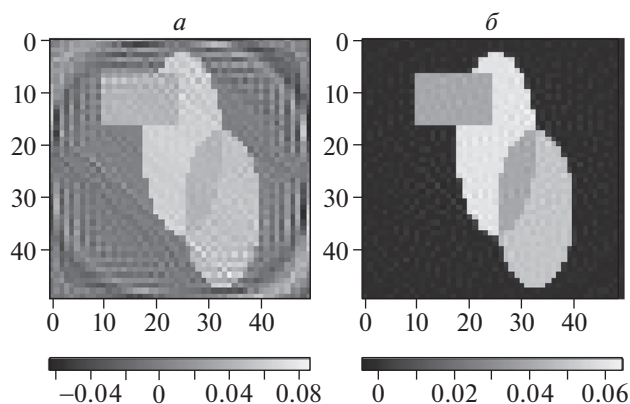


Рис. 6. Результаты реконструкции: *a* – методом SIRT, *б* – предлагаемым методом.

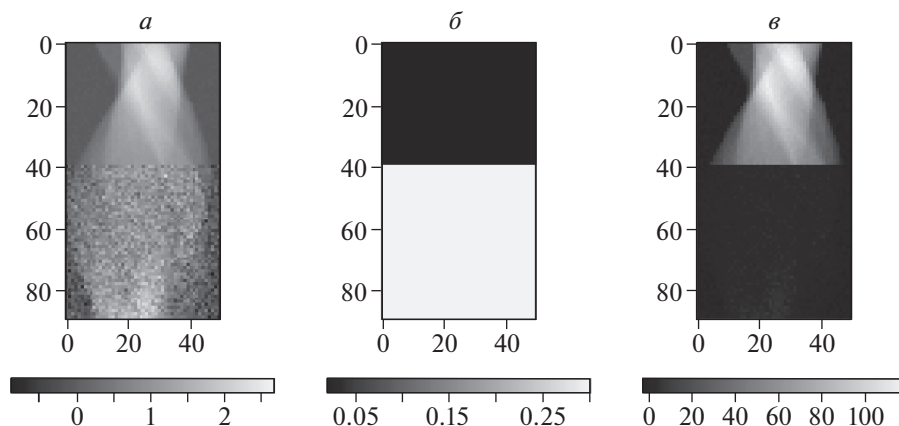


Рис. 7. *a* – модельная синограмма; *б* – карта распределения дисперсии аддитивного шума; *в* – взвешенная синограмма.

100 итераций. Полученные результаты демонстрируют высокую чувствительность нового подхода к наличию аддитивного нормально распределенного шума. Это следует учитывать при

выборе метода реконструкции, если томографирование проведено в нестабильных условиях. Источник нестабильности не имеет значения. Это могут быть небольшие случайные движения

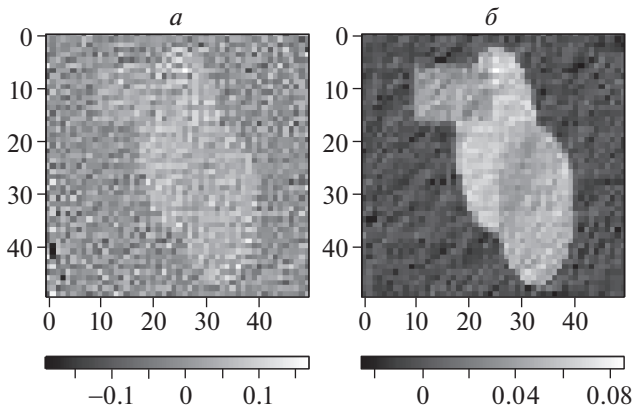


Рис. 8. Результаты реконструкции алгебраическими методами: *a* – методом SIRT, *б* – предлагаемым методом.

самого объекта или биения держателя образца. На рисунке представлен результат выполнения 50 итераций.

Последний модельный пример является иллюстрацией случая, когда время регистрации одной проекции (время экспозиции) мало. Расчет модельных значений синограммы (рис. 9, *a*) проводился с учетом распределения Пуассона. Распределение значений стандартного отклонения представлено на (*б*). Взвешенные на обратную величину стандартного отклонения значения синограммы, использованные при решении СЛАУ, даны на (*в*).

Томографическая реконструкция была методом SIRT (рис. 10, *a*) и предложенным методом с учетом гетероскедастичности (*б*). Итерационный процесс был остановлен после 100 итераций.

На изображении, восстановленном с учетом гетероскедастичности (рис. 10, *б*), визуально наблюдается большая однородность фона, чем при

использовании метода SIRT для реконструкции (*a*). Это свойство оказывается важным при применении автоматических методов оценки качества реконструкции, в которых привлечены интегральные метрики сравнения с опорным (идеальным) изображением (Bulatov et al., 2020). Среднеквадратическое отклонение результатов реконструкции от фантома, использованного для расчета синограммы, при реконструкции методом SIRT составило $1.8E-4$, при реконструкции описанным методом – $1.2E-4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен новый подход к решению задачи томографической реконструкции, в котором учитывается гетероскедастичность шума, присутствующего на регистрируемых позиционно-чувствительным детектором проекциях. Абсолютные значения могут различаться на несколько порядков. Природа такого разброса значений имеет несколько принципиально разных причин. Она может быть обусловлена существенной разницей величин коэффициентов линейного ослабления включений, содержащихся в объекте, и коэффициентов так называемого матрикса (Zszech et al., 2018). Причина может скрываться в сбое работы регистрирующего оборудования или требованием сильного ограничения дозовой нагрузки. Полученные результаты демонстрируют, что учет гетероскедастичности позволяет повысить качество реконструкции. Величина среднеквадратичного отклонения результата реконструкции от фантома, использованного для расчета модельных проекций, в некоторых случаях достигала нескольких порядков.

Следует отметить, что учет свойства гетероскедастичности шума при создании различных математических инструментов предложен не впервые,

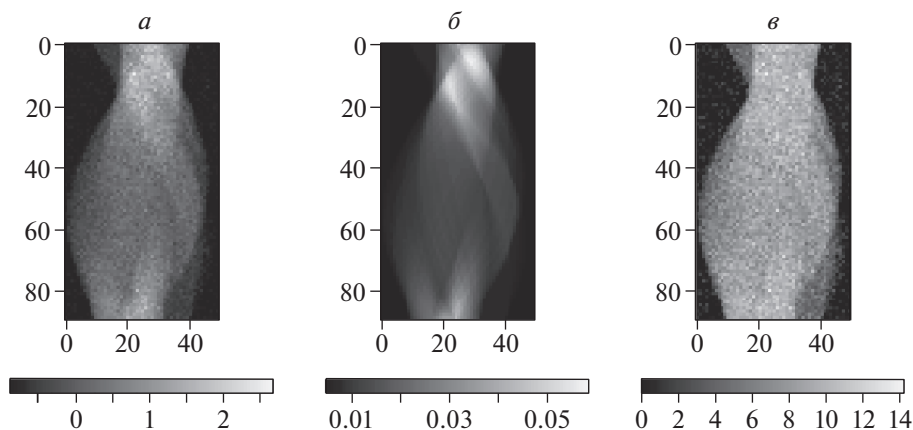


Рис. 9. *a* – модельная синограмма; *б* – распределение дисперсии в поле вида; *в* – использованная в СЛАУ синограмма.

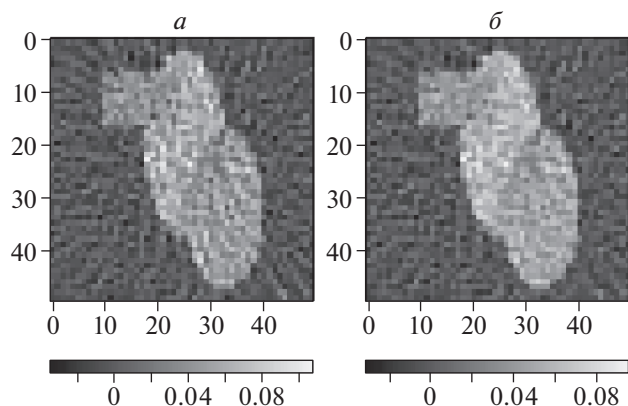


Рис. 10. Результаты реконструкции алгебраическими методами: *а* – методом SIRT, *б* – предлагаемым методом.

поскольку позволяет повысить качество работы математических инструментов. Так, недавно введенное авторами новое пространство цветных координат proLab (Konovalenko et al., 2021) характеризуется тем, что в этом пространстве гетероскедастичность дробового шума меньше, чем в пространстве SAM16-UCS и стандартных цветных пространствах. Это свойство делает proLab удобной координатной системой для линейного цветового анализа. Еще одним примером работы со свойством гетероскедастичности шума является учет данного свойства в модели, используемой для имитации цветных подводных изображений на основе натуральных (Shepelev et al., 2021). Учет гетероскедастичности позволил не занижать дисперсию шума на имитациях подводных снимков. Такая имитация необходима для создания наборов данных, применяемых для автоматического анализа качества вновь создаваемых или тестируемых алгоритмов оценки подводных изображений. Последнее востребовано при исследовании подводных артефактов, разработке систем предотвращения затоплений, картировании дна водоемов и прочее.

В дальнейшем планируется оценить вклад учета гетероскедастичности при решении задачи реконструкции на реальных данных, собранных с нескольких томографов, различающихся условиями съемки.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части томографической реконструкции, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-26036 мк, 18-29-26028 мк) в части анализа полученных результатов.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Д.П. Николаев, А.В. Бузмаков, И.В. Якимчук и И.А. Варфоломеев внесли существенный вклад в проведение исследования, М.В. Чукалина, П.А. Кулагин и А.С. Ингачева внесли весомый вклад в моделирование и написание статьи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гладилин С.А., Котов А.А., Николаев Д.П., Усилин С.А. Построение устойчивых признаков детекции и классификации объектов, не обладающих характерными яркостными контрастами. *ИТnBC*. 2014. № 1. С. 53–60.
- Коднянко В.А. Условная минимизация слабоумодальных функций методом бинарного сканирования (бискана). *Вестник ЮУрГ, серия Вычислительная математика и информатика*. 2018. Т. 7. № 4. С. 59–66.
<https://doi.org/10.14529/cmse180404>
- Aguilleiro J.I., Fernandez J.J. Fast tomographic reconstruction on multicore computers. *Bioinformatics*. 2011. V. 27 (4). P. 582–583.
<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq692>
- Arlazarov V.L., Nikolaev D.P., Arlazarov V.V., Chukalina M.V. X-ray tomography: the way from layer-by-layer radiography to computed tomography. *Computer Optics*. 2021. V. 45 (6). P. 897–906.
- Balasubramani V., Montresor S., Tu H-Y., Huang C-H., Picart P., Cheng C-J. Influence of noise-reduction techniques in sparse-data sample rotation tomographic imaging. *Applied Optics*. 2021. V. 60. P. B81–B87.
<https://doi.org/10.1364/AO.415284>
- Bulatov K., Chukalina M., Buzmakov A., Nikolaev D., Arlazarov V. V. Monitored reconstruction: computed tomography as an anytime algorithm. *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 110759–110774.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002019>
- Gilbert P. Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections. *J. Theoretical Biology*. 1972. V. 36 (1). P. 105–117.
- Grigoriev M., Khafizov A., Kokhan V., Asadchikov V. Robust technique for representative volume element identification in noisy microtomography images of porous materials based on pores morphology and their spatial distribution. *Proc. SPIE, Thirteenth International Conference on Machine Vision*. 2021. V. 11605. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1117/12.2586785>
- Inoue H. Efficient tomographic reconstruction for commodity processors with limited memory bandwidth. *13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*. 2016. P. 747–750.
<https://doi.org/10.1109/ISBI.2016.7493374>
- Kak A.C., Slaney M. *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. NY. IEEE Press, 1988. 329 p.

- Konovalenko I.A., Smagina A.A., Nikolaev D.P., Nikolaev P.P. ProLab: A Perceptually Uniform Projective Color Coordinate System. *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 133023–133042.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115425>
- Lasio G.M., Whiting B.R., Williamson J.F. Statistical reconstruction for x-ray computed tomography using energy-integrating detectors. *Physics in Medicine & Biology*. 2007. V. 52. (8). P. 2247–2266.
- Pietsch P., Wood V. X-Ray tomography for lithium ion battery research: a practical guide. *Annual Review of Materials Research*. 2017. V. 47. P. 451–479.
<https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070616-123957>
- Saha S., Tahtali M., Lambert A., Pickering M. Novel algebraic reconstruction technique for faster and finer CT reconstruction. *Proc. SPIE, Fifth International Conference on Machine Vision (ICMV 2012): Computer Vision, Image Analysis and Processing*. 2012. V. 8783. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1117/12.2011073>
- Sartini S., Frizzi J., Borselli M., Sarcoli E., Granai C., Gealli V., Cevenini G., Guazzi G., Bruni F., Gonelli S., Postorelly M. Which method is best for an early accurate diagnosis of acute heart failure? Comparison between lung ultrasound, chest X-ray and NT pro-BNP performance: a prospective study. *Internal and Emergency Medicine*. 2017. V. 12. P. 861–869.
<https://doi.org/10.1007/s11739-016-1498-3>
- Shepelev D.A., Bozhkova V.P., Ershov E.I., Nikolaev D.P. Simulating shot noise of color underwater images. *Computer Optics*. 2020. V. 44 (4). P. 671–679.
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-754>
- Withers P.J., Bouman C., Carmignato S., Cnudde V., Grimaldi D., Hagen C.K., Meire E., Manley M., Du Plessis A., Stock S.R. X-ray computed tomography. *Nature Reviews Methods Primers*. 2021. V. 1. (18). P. 1–21.
<https://doi.org/10.1038/s43586-021-00015-4>
- Zschech E., Löffler M., Krüger P., Gluch J., Kutukova K., Zgłobicka, I., Silomon J., Rosenkranz R., Standke Y., Topal E. Laboratory computed X-ray tomography – a nondestructive technique for 3D microstructure analysis of materials. *Practical Metallography*. 2018. V. 55 (8). P. 539–555.
<https://doi.org/10.3139/147.110537>

Heteroscedasticity correction to improve tomographic reconstruction with an algebraic approach

M. V. Chukalina^{a,b,#}, A. S. Ingacheva^{b,c}, A. V. Buzmakov^{a,b}, I. V. Yakimchuk^d, I. A. Varfolomeev^d, P. A. Kulagin^e, and D. P. Nikolaev^{b,c}

^a FSRC Crystallography and photonics, 119333 Moscow, Leninskii prospect, 59, Russia

^b Smart Энджинс Сервис, 117312 Moscow, pr. 60-letiya Oktyabrya, 9, Russia

^c Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute), 127051 Moscow, Bolshoi karetnii., 19, Russia

^d Moscow Research Center Schlumberger, 125171 Moscow, Leningradskoe shosse, 16 A, str. 3, Russia

^e Moscow Institute of Physics and Technology, 141701 Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy per. 9, Russia

[#]E-mail: chukalinamarina@gmail.com

Computed tomography is a non-destructive method of artificial intelligence, makes it possible to reconstruct the internal morphological structure of the objects from a set of projections collected at different angles. The object is probed by X-rays, which are attenuated as they pass through the object. Attenuated radiation is collected by a position-sensitive detector. This is a stochastic process. The signal formation model has based on the Poisson distribution. The exposure time is an important parameter of the measuring system and, along with the absorbing properties of the sample itself, determines the probabilistic characteristics of the collected data. As shorter the exposure time as greater the variance of the collected data, i.e. the values are heteroscedastic. Heteroscedasticity generates distortions in the reconstructed images that interfere with the correct interpretation of the results. In this paper, we propose a reconstruction method based on the algebraic approach. The main idea of the method is to add a “confidence” matrix to the system of linear algebraic equations to be solved. The matrix is calculated based on the results of the analysis of the variance of the collected signals. The step of the gradient optimization method used to solve the equations system is written out. The results of experiments on synthetic data show an increase in the accuracy of reconstruction when taking into account heteroscedasticity.

Key words: X-ray tomography, artificial intelligence method, tomographic reconstruction, heteroscedasticity

REFERENCES

- Gladilin S., Kotov A., Nikolaev D., Usilin S. *Postroenie ustojchivyyh priznakov detekcii i klassifikacii ob'ektov, ne obladajushhih harakternymi jarkostnymi kontrastami* [Construction of stable signs of detection and classification of objects that do not have characteristic brightness contrasts]. *ITiVS* [Journal of Information Technologies and Computing Systems]. 2014. № 1. P. 53–60 (in Russian).
- Kodnyanko V.A. Binary Scanning Search (Biscan) for Conditional Minimization of Weakly Unimodal Functions. *Bulletin of the South Ural State University, Series “Computational Mathematics and Software Engineering”*.

- ing". 2018. V. 7 (4). P. 59–66 (in Russian)
<https://doi.org/10.14529/cmse180404>
- Agulleiro J.I., Fernandez J.J. Fast tomographic reconstruction on multicore computers. *Bioinformatics*. 2011. V. 27 (4). P. 582–583,
<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq692>
- Arlazarov V.L., Nikolaev D.P., Arlazarov V.V., Chukalina M.V. X-ray Tomography: the Way from Layer-by-layer Radiography to Computed Tomography. *Computer Optics*. 2021. V. 45 (6). P. 897–906.
- Balasubramani V., Montresor S., Tu H-Y., Huang C-H., Picart P., Cheng C-J. Influence of noise-reduction techniques in sparse-data sample rotation tomographic imaging. *Applied Optics*. 2021. V. 60. P. B81–B87.
<https://doi.org/10.1364/AO.415284>
- Bulatov K., Chukalina M., Buzmakov A., Nikolaev D., Arlazarov V.V. Monitored Reconstruction: Computed Tomography as an Anytime Algorithm. *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 110759–110774.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002019>
- Gilbert P. Iterative Methods for the Three-dimensional Reconstruction of an Object from Projections. *J. Theoretical Biology*. 1972. V. 36 (1). P. 107–115.
- Grigoriev M., Khafizov A., Kokhan V., Asadchikov V. Robust technique for representative volume element identification in noisy microtomography images of porous materials based on pores morphology and their spatial distribution. *Proc. SPIE, Thirteenth International Conference on Machine Vision*. 2021. V. 11605. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1117/12.2586785>
- Inoue H. Efficient tomographic reconstruction for commodity processors with limited memory bandwidth. 2016 IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI). 2016. P. 747–750.
<https://doi.org/10.1109/ISBI.2016.7493374>
- Kak A.C., Slaney M. Principles of Computerized Tomographic Imaging. NY. IEEE Press, 1988. 329 p.
- Konovalenko I.A., Smagina A.A., Nikolaev D.P., Nikolaev P.P. ProLab: A Perceptually Uniform Projective Color Coordinate System. *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 133023–133042.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115425>
- Lasio G.M., Whiting B.R., Williamson J.F. Statistical reconstruction for x-ray computed tomography using energy-integrating detectors. *Physics in Medicine & Biology*. 2007. V. 52 (8). P. 2247–2266.
- Pietsch P., Wood V. X-Ray Tomography for Lithium Ion Battery Research: A Practical Guide. *Annual Review of Materials Research*. 2017. V. 47. P. 451–479.
<https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070616-123957>
- Saha S., Tahtali M., Lambert A., Pickering M. Novel algebraic reconstruction technique for faster and finer CT reconstruction. Proc. SPIE, Fifth International Conference on Machine Vision (ICMV 2012): *Computer Vision, Image Analysis and Processing*. 2012. V. 8783. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1117/12.2011073>
- Sartini S., Frizzi J., Borselli M., Sarcoli E., Granai C., Gealli V., Cevenini G., Guazzi G., Bruni F., Gonelli S., Postorelly M. Which method is best for an early accurate diagnosis of acute heart failure? Comparison between lung ultrasound, chest X-ray and NT pro-BNP performance: a prospective study. *Internal and Emergency Medicine*. 2017. V. 12. P. 861–869.
<https://doi.org/10.1007/s11739-016-1498-3>
- Shepelev D.A., Bozhkova V.P., Ershov E.I., Nikolaev D.P. Simulating shot noise of color underwater images. *Computer Optics*. 2020. V. 44 (4). P. 671–679.
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-754>
- Withers P.J., Bouman C., Carmignato S., Cnudde V., Grimaldi D., Hagen C.K., Meire E., Manley M., Du Plessis A., Stock S.R. X-ray computed tomography. *Nature Reviews Methods Primers*. 2021. V. 1 (18). P. 1–21.
<https://doi.org/10.1038/s43586-021-00015-4>
- Zschech E., Löffler M., Krüger P., Gluch J., Kutukova K., Zgłobicka, I., Silomon J., Rosenkranz R., Standke Y., Topal E. Laboratory Computed X-Ray Tomography – A Nondestructive Technique for 3D Microstructure Analysis of Materials. *Practical Metallography*. 2018. V. 55 (8). P. 539–555.
<https://doi.org/10.3139/147.110537>

ЭДУАРД ПЕТРОВИЧ ЗИНКЕВИЧ

DOI: 10.31857/S0235009222010085

Ушел из жизни наш друг и коллега, доктор химических наук Эдуард Петрович Зинкевич. Делом его более чем полувековой научной карьеры было изучение механизмов обоняния и химического строения природных соединений.

Эдуард Петрович родился 9 мая 1936 г. на Донбассе в Горловке. Окончил Львовский государственный университет им. И. Франко, по окончании которого работал в исследовательской лаборатории фенольного завода в Донецкой области. Уже здесь он проявил себя как талантливый рационализатор. Многие его предложения, подчас весьма оригинальные, были реализованы в производстве.

В 1961 г. Эдуард Петрович поступил в аспирантуру Московского института тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова на кафедру химии и технологии тонких органических соединений под руководством профессора Н.А. Преображенского и в 1965 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию. Руководитель предложил молодому кандидату остаться на кафедре, но Эдуард Петрович хотел реализовать себя в другом направлении. Еще будучи студентом, он загорелся проблемой кодирования запахов и твердо решил посвятить себя изучению химических основ обоняния, но реализовать задуманное ему удалось не сразу. Первыми его объектами стали растения. Во Всесоюзном НИИ лекарственных и ароматических растений он занимался химией природных соединений, в частности, гликозидов, входящих в состав многих видов растений, что нашло свое практическое применение в фармакологии. И только в 1971 г. он смог реализовать свою мечту — работать с животными, исследовать строение их пахучих экскретов, раскрывать механизмы обоняния. Владимир Евгеньевич Соколов, директор Института эволюционной морфологии и экологии животных им. А.Н. Северцова АН СССР, заинтересованный в изучении коммуникации животных, решил усилить это направление химической коммуникацией. Нужны были химики, которые были бы готовы приложить свои знания к биологии, и Эдуард Петрович был для этого идеальной кандидатурой. Владимир Евгеньевич дал ему возможность сформировать группу по изучению химической коммуникации животных, в которую постепенно вошли химики-органики (для синтеза), химики-аналитики, нейрофизиологи и, конечно, биологи. Под руководством Зинкевича было проведено исследование химических составов секретов специфических кожных

желез более 30 видов высших позвоночных, выявлены связи состава секретов с видом, полом, возрастом животного.

Важное направление, которому Эдуард Петрович также уделял большое внимание, — возможность регуляции численности вредных видов. Большой вклад внес Э.П. Зинкевич и в расширение исследований химической коммуникации животных. В 1979 г. вместе с В.Е. Соколовым он разработал “Всесоюзную программу исследований феромонов и химической коммуникации животных”, объединившую работу сотен научных сотрудников из десятков институтов нашей страны и различных ведомств. По его инициативе регулярно проводились Всесоюзные, а затем Российские конференции, опубликованы сотни статей, выпущено несколько руководств и сборников, таких как “Феромоны и поведение” М., 1982; “Химические сигналы животных” М., 1982; “Сигнализация и экология млекопитающих и птиц” М., 1984; “Химическая коммуникация животных” М., 1986; “Химическая коммуникация животных. Фундаментальные проблемы” М., 2006 и многие другие, всесторонне отражавшие исследования химической коммуникации и феромонов беспозвоночных и позвоночных животных, а также человека.

В 2003 г. Э.П. Зинкевич защитил докторскую диссертацию “Феромоны и механизмы химической коммуникации млекопитающих”, которая представляла собой обобщение его множественных публикаций в области химической коммуникации.

Нельзя не отметить и многочисленные выступления Э.П. Зинкевича в средствах массовой информации, его участие в теле- и радиопередачах. Это “Мозговой штурм” с А. Урманцевой, “Диалоги: Природа запаха” у А.Гордона, “Рецепторы”: Истории из будущего с М. Ковальчуком.

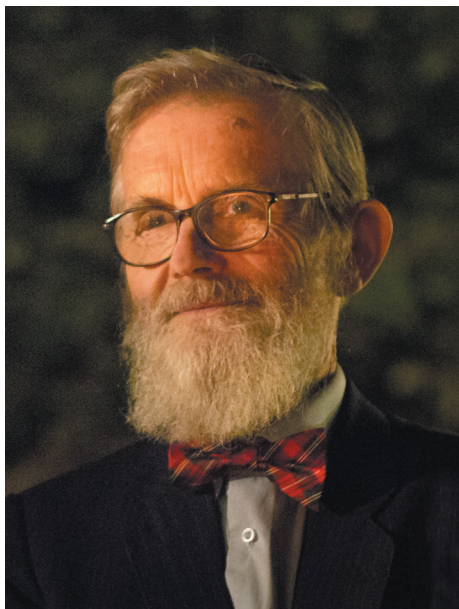
Эдуард Петрович был членом редакционного совета и постоянным автором журнала “Сенсорные системы”. Статьи, излагающие результаты его блестящих исследований, придавали журналу авторитет и значимость.

Память об Эдуарде Петровиче Зинкевиче навсегда сохранится у его учеников и соратников, а его вклад в развитие химической коммуникации будет внесен в историю науки.

Редакционная коллегия и Редакция журнала “Сенсорные системы” присоединяются к словам светлой памяти о выдающемся исследователе и добром товарище.

ИВАН НИКОЛАЕВИЧ ПИГАРЁВ

DOI: 10.31857/S0235009222010061



14 июля 2021 г. на 81-м году жизни трагически погиб Иван Николаевич Пигарёв — доктор биологических наук, главный научный сотрудник Института проблем передачи информации РАН.

Институт проблем передачи информации РАН потерял в лице Ивана Николаевича Пигарева одного из своих самых ярких и творческих сотрудников, разрабатывавшего фундаментальные проблемы нейрофизиологии в течение более полувека. Он пришел в институт в 1961 г. старшекурсником кафедры высшей нервной деятельности биологического факультета МГУ для выполнения дипломной работы по моделированию пассивных электрических свойств сетчатки. После защиты диплома И.Н. Пигарев был принят в лабораторию биофизики зрения (сейчас это лаборатория передачи информации в сенсорных системах), в которой проработал всю жизнь.

Ранний период собственных исследований Ивана Николаевича пришелся на пору становления нейроэтологии как науки, указывающей на конкретные типы нейронов, ответственные за те или иные врожденные стереотипы поведения: нейроны как физиологические адекватные ключевым стимулам классической этологии Лоренца и др. Общеизвестным началом этого направления считают работу четверых зарубежных ученых —

Джерома Леттвина, Уолтера Питтса, Уоррена МакКаллока и Умберто Матурано “Что говорит глаз лягушки мозгу лягушки” (1959). Вместе с Г.М. Зенкиным Иван Николаевич провел первые в нашей стране опыты по микроэлектродной регистрации импульсной активности ганглиозных клеток лягушки — путем отведения от крыши ее среднего мозга, впервые освоив у нас (а по сути, введя в общую практику) изготовление платинированных микроэлектродов “по Джестеленду”, обладающих малым входным сопротивлением. Одной из первых их совместных работ был опыт применения таких микроэлектродов для регистрации нейронной активности зрительных нейронов в свободном поведении лягушки, что было выполнено при помощи миниатюрных приспособлений для крепежа самодельного микроманипулятора на черепе животного — первого в серии многих подобных инженерных решений, применявшихся впоследствии И.Н. Пигаревым в работах на кошках и обезьянах. Спустя много лет, когда Иван Николаевич работал в США, он не мог не посетить Джерома Леттвина. Поначалу Леттвин был не слишком любезен, но узнав, что И.Н. Пигарев успешно повторил их методику и, более того, проводил опыт на свободной прыгающей лягушке, проникся симпатией и расстались они друзьями.

В той же серии совместных с Г.М. Зенкиным работ нейроэтологического плана выделяется развитие представлений об организации тектальной проекции щуки — рыбы, которой свойственно держаться неподвижно в потоке воды: в ее зрительной проекции доминируют “детекторы движения от хвоста к голове” или, другими словами, детекторы сдвига вниз по течению относительно зрительно воспринимаемого окружения, малейшего сигнала от которых достаточно для внесения нужной поправки в биологически осмысленную систему контроля положения.

Следующие исследования И.Н. Пигарева были выполнены на кошках и обезьянах. Каскад инженерных решений микроэлектродных отведений при помощи оригинальных приспособлений, позволяющих видеть работу нейронов зрительной коры бодрствующей кошки (т.е. без применения какого-либо наркоза) в ответ на зрительные стимулы, с одновременной регистрацией движений глаз кошки — посредством опять-таки оригинальной (самодельной) системы датчиков-

колец, закрепленных на глазе кошки, и “куба Гельмгольца” для самой регистрации движений. Этот этап полон методических новаций и коррекций интересов самого Ивана Николаевича. Новые инженерные решения рождались каждый день и претворялись Иваном Николаевичем в жизнь немедленно в мастерской, которая была в то время в лаборатории. Неистощимая фантазия Ивана Николаевича позволяла находить неожиданные стимулы для нейронов разных областей коры, что позволило описать множество новых свойств нейронов. Проникновение в новые и новые кортикальные зрительные проекции привело его к убежденному непринятию устоявшегося представления “из рук нобелевских лауреатов” — о принципе последовательной зависимости проекций ($V1 \rightarrow V2 \rightarrow V3...$) в их системе, и к столь же убежденному представлению о системе самостоятельных, по сути, “первичных”, независимых зрительных кортикальных проекций кошки. Вполне логичным был здесь переход интереса, точнее — коррекция направления опытов, от кошки к обезьяне. Общим итогом этого глубокого пересмотра явилась его докторская диссертация, и большая глава, написанная И.Н. Пигаревым в “Руководство по физиологии”.

Третье направление интересов Ивана Николаевича — физиология сна, возникло на основе попутных наблюдений при длительной регистрации импульсной активности корковых нейронов в ходе опытов с ненаркотизированной кошкой, засыпающей или дремлющей в станке. Так или иначе, обнаружилось, что нейроны, в бодрствующем состоянии животного отвечающие на зрительные стимулы, в фазе сна отвечают на что-то иное, никакого отношения к зрению не имеющее. Отсюда берет свое начало догадка, что во сне зрительная кора переключается на обработку совершенно

иного потока информации, не имеющего доступа к коре в фазу бодрости по причине отсутствия в коре собственной проективной области. Эта догадка привела Ивана Николаевича к созданию висцеральной теории сна, работу над которой прервала трагическая авария.

Иван Николаевич был трудоголиком, работа была главным удовольствием в его жизни, и никакие обстоятельства не могли помешать ему в его исследованиях. Однако сам Иван Николаевич написал о себе так: “Несмотря на то, что научная работа всегда была для меня очень важной жизненной составляющей, самым главным в своей жизни я, без сомнения, считаю нашу семью и наших замечательных детей, и внуков. Сделанные научные открытия рано или поздно были бы сделаны и другими людьми, но такие дети могли появиться только в нашей семье”.

Иван Николаевич был бессменным замечательным кинолетописцем лаборатории, в его архивах сохранились сотни видеозаписей. Он собрал своими руками автомобиль. Яхту, построенную Иваном Николаевичем с друзьями и коллегами, помнят старшие жители Николиной горы. Он обладал удивительным качеством притягивать к себе людей. К нему легко обращались и с профессиональными вопросами, и с житейскими проблемами. Его зарубежные коллеги с теплотой вспоминают общение с ним и его экскурсии по Москве.

Гибель И.Н. Пигарева — тяжелая потеря для всех, кто с ним работал и близко общался, для сотрудников института и зарубежных коллег, для редакции нашего журнала. Несмотря на свои годы, И.Н. Пигарев оставался молодым, полным энергии, вдохновения и творческих планов, заражающим коллег своим энтузиазмом.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА “СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ”

DOI: 10.31857/S023500922101011X

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

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

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

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

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

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

К рукописи обязательно должны быть приложены:

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

Прохождение рукописей

Все рукописи, поступившие в редакцию, рецензируются не менее чем двумя рецензентами “слепым” рецензированием. В роли рецензентов могут выступать внешние эксперты и члены редколлегии. Решение о публикации принимается Редколлегией журнала на основе полученных рецензий. Автор может рекомендовать двух-трех рецензентов для своей работы, но право выбора рецензентов остается за 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, подрисованные подписи, таблицы и рисунки.

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

При первом введении аббревиатур дается их полная расшифровка. Другие сокращения слов, кроме единичных измерений 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. Рекомендуется, чтобы ширина рисунка на странице составляла 8-8.5 см (на одну колонку) или 17-17.5 см (на две колонки). При этом с рукописью обязательно должны быть сданы исходные файлы иллюстраций.

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

Если рисунок содержит несколько фрагментов, они обозначаются по порядку курсивными строчными буквами русского алфавита: *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 Издателей этих публикаций разрешение на перепечатку или использование материалов. Подробнее: <https://www.pleiades.online/ru/authors/permission/>

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

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

Дополнительные материалы

Для более полного описания исследования, к статье могут прилагаться дополнительные материалы (аудио- и видеофайлы, презентации, дополнительные таблицы и рисунки и пр.) при условии, если автор является правообладателем 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. Иванов¹). В английском резюме аффилиации отмечаются латинскими буквами (I.I. Ivanov^a). Контактный адрес e-mail одного из авторов. Контактный автор в тексте отмечается звездочкой (например, И.И. Иванов^{1,*}). В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov[#]).

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

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

– Ключевые слова.

– DOI: (DOI будет вписан редакцией).

Пример оформления шапки русскоязычной части статьи:

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ

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

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

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

*E-mail: author1@mail.ru

Поступила в редакцию ...

После доработки ...

Принята к публикации ...

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

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

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

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

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

– **Заключение или Выводы.**

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

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

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

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

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

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

– **Список литературы.**

– **Резюме** на английском языке.

– **REFERENCES.**

Резюме на английском языке включает:

– Заглавие.

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

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

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

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

– Ключевые слова (key words).

Пример оформления шапки английского резюме:

Paper title

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

При наличии у публикации DOI, его указание обязательно.

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

Оформление раздела “Список литературы”

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

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

Список составляется по следующему образцу.

Книги

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

Статьи и главы в книгах, неперидических изданиях, сборниках трудов

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

Статьи в журналах

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

Диссертации и авторефераты диссертаций

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

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

Интернет-ресурсы

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

ГОСТы

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

Патенты

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

Оформление раздела “REFERENCES”

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

Книги

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

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

Статьи и главы в книгах, неперIODических изданиях, сборниках трудов

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

Статьи в журналах

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

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

Диссертации и авторефераты диссертаций

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

Интернет-ресурсы

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

ГОСТы

GOST 8.586.5–2005. *Izmerenie raskhoda i kolichestva 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 и дублировать на адрес sensys-li@mail.ru.

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