

DOI: 10.18721/JCSTCS.12202
УДК 004.932.2:003.63

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ БРУСКОВЫХ И СЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ МЕТОДОМ АЙ-ТРЕКИНГА

Т.К. Ермолова, П.Д. Иващенко, В.В. Лаптев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Понимание механизмов декодирования информации во время создания диаграмм во многом гарантирует корректность и эффективность интерпретации заложенной в них информации во время считывания пользователем. В статье описаны основные подходы к представлению статических структур данных при помощи различных графических образов (секторных, кольцевых, столбиковых и полосовых диаграмм), рассмотрены исследования по определению эффективности визуализации при помощи систем отслеживания глазодвигательной активности (метода ай-трекинга). На основе статистического анализа, в том числе с использованием кластерного анализа координат точек фиксации глаз испытуемых, получено подтверждение гипотезы о существовании различных паттернов и подходов к восприятию диаграмм, выявлены недостатки визуализации информации при помощи секторных диаграмм. Сформулированы рекомендации по визуализации статических структур данных.

Ключевые слова: инфографика, визуализация данных, секторные диаграммы, кольцевые диаграммы, брусковые диаграммы, ай-трекинг.

Ссылка при цитировании: Ермолова Т.К., Иващенко П.Д., Лаптев В.В. Изучение эффективности визуализации статических структур данных с помощью брусковых и секторных диаграмм методом ай-трекинга // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 2. С. 16–27. DOI: 10.18721/JCSTCS.12202

STUDYING THE EFFICIENCY OF VISUALIZATION OF STATIC DATA STRUCTURES BY MEANS OF BAR AND PIE CHARTS BY EYE-TRACKING METHOD

T.K. Ermolova, P.D. Ivaschenko, V.V. Laptev,

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

The understanding of the mechanisms used for decoding information ensures efficient and correct interpretation of the information if it is taken into consideration during the design process. The article describes the most popular approaches to the visual presentation of static data structures with the help of graphic images (pie charts, donut charts, vertical and horizontal bar charts), an overview different eye-tracking studies of the effectiveness of visualization is given. Based on the statistical analysis, including cluster analysis of the

coordinates of the fixation points of the subjects' eyes, a confirmation of the hypothesis of the existence of various patterns and approaches to the perception of diagrams was obtained. The drawbacks of visualization of information using pie charts were discovered. Certain recommendations for the visualization of static data structures were formulated.

Keywords: infographics, data visualization, pie charts, donut charts, bar charts, eye-tracking.

Citation: Ermolova T.K., Ivaschenko P.D., Laptev V.V. Studying the efficiency of visualization of static data structures by means of bar and pie charts by eye-tracking method. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 2, Pp. 16–27. DOI: 10.18721/JCSTCS.12202

Введение

Визуализация в части представления совокупностей числовых данных различного рода и управление их восприятием – важная прикладная задача. Ее решение непосредственно связано с выбором графического образа, соответствующего семантически и перцепционно конкретному набору данных. Во время создания диаграммы информация кодируется в геометрические или изобразительные фигуры, а во время считывания – декодируется для дальнейшего анализа. Соответственно корректное построение диаграмм является залогом правильного решения визуализации числовой информации, при этом эффективное представление количественных показателей требует понимания чисел и способности показать их в виде графического сообщения для точной и эффективной интерпретации читателем [1, с. 9]. Следует также учитывать характер сравнения, определяющего назначение статистических графиков и являющегося одним из основополагающих критериев типологии количественной инфографики [2, с. 106]. Среди прочих – это сравнение структур явлений, состоящих из нескольких компонентов. Цель данной работы – определение влияния типа визуализации единичной статической структуры данных на эффективность ее восприятия.

В настоящее время имеются разнообразные инструменты информационной графики для представления структурных диаграмм. Они служат для выявления размеров отдельных компонентов, их отноше-

ния к целому и сравнения между собой. Речь идет о пропорциях значений отдельных элементов или структуре совокупности, состоящей из нескольких долей. Одна и та же структура данных может быть визуализирована с помощью различных диаграмм: брусковых стековых (полосовых, столбиковых), секторных (круговых и кольцевых), фигурных и потоковых, а также используя древовидные карты и процентные квадраты. Правильный выбор формы зависит от целого ряда факторов: контекста, семантических связей формы диаграммы и контента, удобочитаемости, композиции и простоты восприятия [3].

К распространенным инструментам визуализации относятся секторные диаграммы и их производные, например, кольцевые диаграммы. Они наиболее удачно демонстрируют структуру одиночной совокупности, поскольку круг является олицетворением целого (100 %), а его сектора – процентных долей. Очевидным конкурентом по визуализации данного типа числовых данных признаны брусковые стековые диаграммы горизонтального и вертикального расположения. В данной статье сравнивается эффективность восприятия различных типов диаграмм визуализации структуры данных, изучаются особенности формирования паттерна рассматривания при помощи метода ай-трекинга.

Анализ проблемы

Каждый тип представления структур имеет свои проектные правила и рекомендации к построению, ограничивающие об-

ласти применения [4]. Секторные диаграммы принято формировать не более чем из пяти секторов, которые не должны ни резко отличаться по величине, с одной стороны, ни быть примерно равнозначными, с другой. Данные должны быть упорядочены, поэтому сектора располагаются от большего к меньшему от верхнего вертикального радиуса. К особенностям построения брусковых стековых диаграмм относится запрет на искривление координатных осей и соответствующего искажения формы столбиков или полос. Кроме того, столбики и полосы изображаются полностью, т. к. в первую очередь сравниваются линейные размеры их долей и целого, поэтому необходимо обеспечить обязательность нулевой отметки и отсутствие разрывов в диаграмме, т. е. запрещается разрывать ось значений X для полосовой, а ось Y для столбиковой диаграммы.

Для визуализации большого количества структур данных существует возможность использования и секторных, и брусковых диаграмм. Исследователи неоднократно затрагивали проблему инвариантности использования круговых и брусковых диаграмм. Так, американский ученый Карл Карстен выступил с критикой восприятия секторных диаграмм. Он опирался на предположение, что отдельные сектора диаграммы представляются человеком в виде набора площадей, плохо оцениваемых человеческим взглядом. На основании чего Карстен сделал вывод, что визуализация при помощи секторных диаграмм нежелательна [5].

Первым вопрос сопоставления эффективности секторных и брусковых диаграмм поднял Вальтер Иллс в 1926 г. Изучив считывание двух типов диаграмм, он пришел к выводу, что секторные диаграммы считываются так же быстро, как и брусковые. Более того, было отмечено, что секторные диаграммы позволяют прочесть данные более точно [6]. Согласно опросу, большая часть испытуемых оценивала значения секторов при помощи дуг, а остальные руководствовались площадью секторов или

размером углов. По итогам экспериментов Иллс установил, что секторные диаграммы привлекательны и привычны.

Дальнейшее сравнение секторных и брусковых диаграмм показало, что, несмотря на критические замечания по процедуре эксперимента Иллса, подтвердилась эффективность секторных диаграмм: они действительно считывались быстрее и точнее [7].

Дискуссия относительно формы структурных диаграмм продолжилась Уильямом Кливлендом. В своих работах он неоднократно выступал с критикой секторных диаграмм, указывая на то, что по сравнению с брусковыми они менее эффективны [8, 9]. И это несмотря на то, что секторные диаграммы считаются более интуитивными для человека (круг — целое, сектор — доля). Он обращал внимание на абстрактность и ограниченность такого типа визуализации, который должен применяться только в редких случаях. Кливленд опубликовал данные эксперимента, в котором предлагал сравнить сегмент секторной диаграммы и брусковую диаграмму [8]. Это исследование показало, что брусковые диаграммы были в два раза эффективнее секторных. Однако, стоит отметить, что секторные диаграммы, которые Кливленд применял в своем эксперименте, были построены не по общепринятым правилам, тогда как брусковые столбиковые диаграммы были построены по всем правилам, и к ним также предлагались шкалы для более эффективного считывания.

В 1991 г. Ян Спенс и Стефан Левандовски провели эксперимент на базе компьютера и установили, что секторные диаграммы более эффективны, чем брусковые в тех случаях, когда испытуемым требовалось сравнить несколько графиков. Более того, они отметили, что во время восприятия секторных диаграмм испытуемые визуально обозначали для себя отметки 25, 50 и 100 процентов и считывали диаграммы, исходя из этих отметок [10].

В настоящее время отсутствует единое мнение о том, в каком случае какая из диаграмм — брусковая или секторная — спо-

собны визуализировать данные наилучшим образом. На протяжении долгого времени считалось, что люди визуальнее лучше оценивают длину, чем углы, дуги и площади. В этом заключается преимущество брусковых диаграмм. Однако часть экспериментов, представленных выше, свидетельствуют об обратном. На данный момент исследователи склоняются к анализу процесса восприятия каждой диаграммы по отдельности. Так, Роберт Косара и Дрю Скау провели многочисленные эксперименты в поисках значимого аспекта восприятия секторной диаграммы (центр, угол или внешняя дуга), влияющего на считывание информации [11]. В другой работе рассмотрено влияние размера диаграмм и наличия визуальных ключей на корректность восприятия секторных и кольцевых диаграмм, исследована точность оценки пропорций отдельных частей структуры [12].

Однако вопрос о том, какой способ визуализации структурных данных является наиболее эффективным, так и остается открытым. Здесь под эффективностью визуального восприятия информации понимается точность и скорость решения задачи [13, с. 139]. Неопределенности выбора геометрического образа и соответствующего типа структурной диаграммы, секторной или брусковой, побуждает продолжить исследования в данном направлении с использованием метода ай-трекинга. Это позволит оценить особенности формирования паттерна рассматривания отдельных видов диаграмм и сформулировать рекомендации по выбору способов визуализации структур данных.

Методы исследования

Механизмы восприятия визуализации структур данных в большинстве указанных выше исследований оценивались при помощи субъективных метрик, таких как опросы и анкетирование. Степень эффективности визуализации оценивалась в зависимости от количества правильных ответов.

В данной статье предлагается методика оценки эффективности выбора формы визуализации данных при помощи кластерного анализа глазодвигательной активности [14], т. н. видеоокулографии или ай-трекинга. Данные, полученные таким образом, позволяют оценить не только правильность восприятия, но и когнитивную нагрузку испытуемых во время решения поисковых задач. Система ай-трекинга передает данные о передвижениях зрачка испытуемого на обработку в компьютер и, исходя из полученных данных, позволяет определить т. н. «зоны интереса» и стратегии восприятия визуальной информации.

В предыдущих исследованиях доказано, что система отслеживания глазодвигательной активности может применяться для решения различных прикладных задач: для оценки влияния композиции макета на понимание диаграмм [15], для анализа подходов к восприятию элементов графов (взаиморасположению узлов и дуг) [16] и для оценки различий в методах восприятия линейных и брусковых диаграмм [17].

Принято считать, что движения глаз отражают три визуальные стратегии при рассматривании: определение формы, распознавание формы и реинтерпретацию формы [18]. Система оценки глазодвигательной активности использует две основные метрики: фиксации и саккады [19]. Фиксации отвечают за момент восприятия информации и интерпретации форм. Саккады показывают процесс поиска информации на представленном стимульном материале [19, 20]. Как следствие, длительность фиксации, количество саккад и их амплитуды могут использоваться в качестве индикаторов интерпретации формы во время поисковых задач различного характера [18, 21].

Таким образом, система анализа глазодвигательной активности позволяет определить степень эффективности и механизмы восприятия инфографики испытуемым, а также обозначить области когнитивной нагрузки во время решения задач [17], что позволит сделать выводы о приоритетности формы визуализации.

Постановка эксперимента

Используемый в данной работе научный метод исследования подразумевает проведение эксперимента на основе айтрекера (электронного видеоокулографа). С его помощью было принято решение провести экспериментальное сравнение визуального восприятия секторных и брусковых диаграмм. В рамках эксперимента подготовили следующий стимульный мате-

риал: пять видов секторных, кольцевых, столбиковых и полосовых диаграмм. Для того, чтобы определить влияние насыщенности цвета на восприятие диаграмм, подготовили второй набор стимульного материала: имеющиеся графики окрасили в инверсированном порядке: от светлого к темному, таким образом, чтобы наибольший сектор был самым светлым, а наименьший – темным (рис. 1).

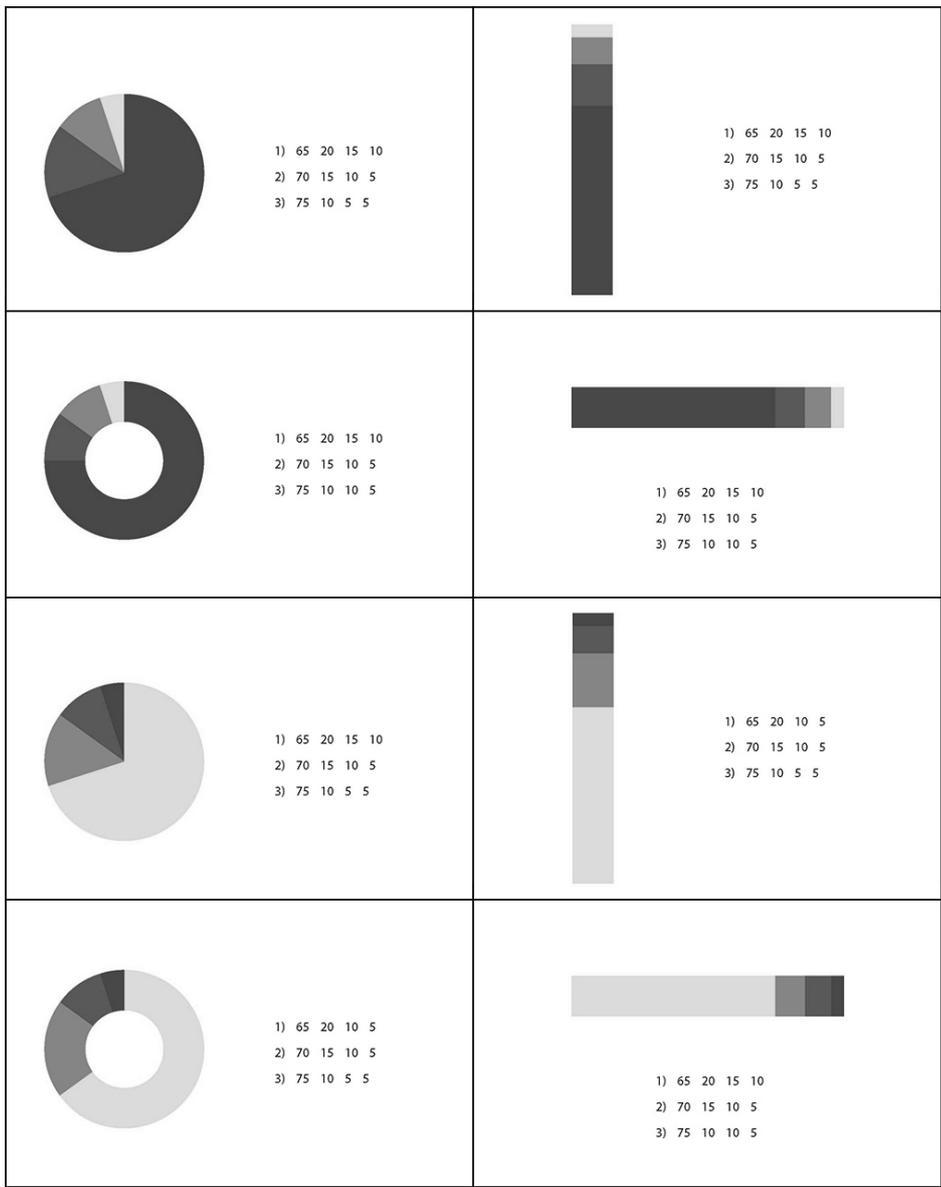


Рис. 1. Стимульный материал: секторная, кольцевая, столбиковая брусковая и полосовая брусковая диаграммы в двух вариантах: от темного большого к светлому меньшему и инверсированный

Fig. 1. Stimulus material: pie chart, donut chart, vertical and horizontal bar chart in two versions: from dark to light smaller and inverted

Диаграммы построили в соответствии с общепринятыми рекомендациями, на каждом графике визуализировалось процентное соотношение из четырех значений: от большего к меньшему, и соответствующий порядок оттенков цвета с изменением насыщенности и светлоты. Справа от каждого графика было представлено три варианта процентных соотношений. Графики окрасили в оттенки одного цвета, что позволило исключить психологическое влияние различных цветов на восприятие информации.

В эксперименте приняло участие 44 испытуемых в возрасте от 19 до 28 лет, студенты различных курсов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. В ходе эксперимента каждому из испытуемых демонстрировалось в случайном порядке по пять графиков из каждой группы. Они рассматривали каждую диаграмму, после чего переходили на страницу опросника, где указывали, какое из предложенных процентных соотношений соответствует рассмотренной диаграмме. Время просмотра диаграмм ограничено не было.

Стимульный материал был представлен на персональном компьютере Intel Core 2 Duo CPU E8400, с оперативной памятью 3,25 Гб и операционной системой Microsoft Windows XP на мониторе BENQ XL2411 24" (53×30 см), 1920×1080 px, 144 Гц. Данные о глазодвигательной активности собирались при помощи системы SMI RED250 и программного обеспечения SMI iViewX.

Калибровка оборудования проводилась в соответствии с методиками и техническими условиями, предъявляемыми к экспериментам с использованием айтрекингового оборудования в лаборатории человеко-компьютерного взаимодействия Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, согласно утвержденному порядку [3].

В ходе эксперимента проверялась основная гипотеза: тип графика (секторный, кольцевой, столбиковый брусковый и полосовой брусковый) влияет на процесс восприятия визуальной информации при отсутствии семантического контекста данных. Исходя из этой гипотезы сформулировано шесть основных вопросов исследования.

Влияет ли тип и порядок следования оттенков цвета графиков:

(RQ 1) на время решаемой задачи;

(RQ 2) на правильность решения задачи;

(RQ 3) на продолжительность фиксации;

(RQ 4) на количество фиксаций;

(RQ 5) на количество саккад;

(RQ 6) на паттерн рассматривания.

Результаты

Во время анализа результатов рассматривались (1) средняя продолжительность фиксации, (2) среднее количество фиксаций, (3) среднее количество саккад, (4) общая продолжительность решения задачи и (5) количество правильных ответов. Отдельно рассматривались паттерны рассматривания и выявленные пространственные кластеры – зоны интереса (AOI).

Программное обеспечение SMI iViewX сохраняет координаты точек и визуализирует различные карты активности (фокусные карты, тепловые карты, карты движений). Все последующие расчеты проводились на основании данных калибровки системы при помощи библиотек языка программирования Python: Pandas, SciPy и NumPy для обработки данных и Matplotlib для построения диаграмм. Кластерный анализ данных проводился при помощи оригинального программного обеспечения. Кластеризация проводилась на основе координатных данных точек фиксаций с выделением зон интереса (AOI). Статистическая значимость оценивалась при помощи однофакторного дисперсионного анализа и теста Шапиро-Уилка при $p < 0,05$.

Было установлено, что секторные диаграммы имели наибольшее среднее количество фиксаций (One Way ANOVA $F = 5,92$, $p = 0,01$) (рис. 2 а). При считывании секторных диаграмм возрастало и среднее количество саккад (One Way ANOVA $F = 6,03$, $p = 0,01$) (рис. 2 б). Интересно, что в ходе эксперимента не была установлена статистически значимая разница между средними длительностями фиксаций для всех типов основного набора диаграмм (One Way ANOVA $F = 1,82$, $p = 0,18$) (рис. 2 в). Анализ правильности ответов показал, что все типы диаграмм одинаково хорошо считывались испытуемыми и статистически значимых отличий нет (рис. 2 г).

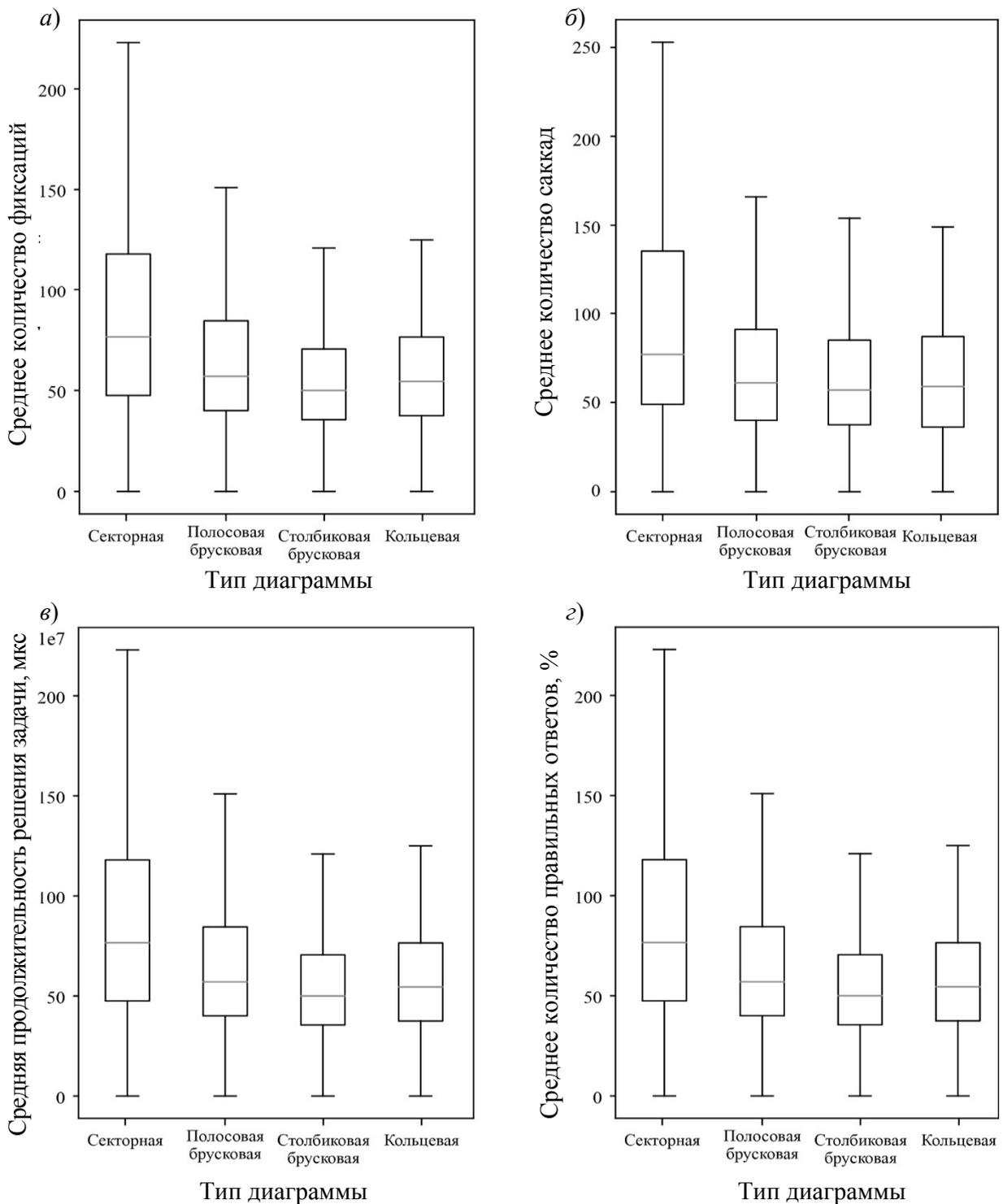


Рис. 2. Распределение значений в зависимости от фактора «Тип диаграммы»: *a* – среднее количество фиксаций; *б* – среднее количество саккад; *в* – средняя продолжительность решения задачи, мкс; *з* – среднее количество правильных ответов

Fig. 2. The distribution of values depending on the «Chart Type» factor: *a* – the average number of fixations; *б* – the average number of saccades; *в* – the average duration of the solution of the problem (microseconds); *з* – average number of correct answers

Таким образом, можно предположить, что во время считывания секторных диаграмм испытуемые дольше и с большим вниманием анализировали информацию, однако при выполнении данной задачи не испытывали больших когнитивных нагрузок. Можно также предположить, что брусковые и кольцевые диаграммы проще оцениваются при быстром рассмотрении, тогда как секторные диаграммы приводят к более детальному изучению.

При сопоставлении темных и светлых графиков было обнаружено, что цвет влияет только на среднюю длительность фиксации у брусковых диаграмм (One Way ANOVA $F = 5,5$, $p = 0,01$): светлые диаграммы имели в среднем меньшую длительность фиксации. У секторных и кольцевых диаграмм такой закономерности обнаружено не было.

Для определения паттернов рассматривания и визуализации зон интересов испытуемых (AOI) построили тепловые карты.

На них цветом выделили те фрагменты стимульного материала, на которых происходили фиксации. Чем насыщенней цвет, тем больше фиксаций приходилось на определенное место на стимульном материале. Такие карты позволяют визуально оценить механизмы восприятия диаграмм. Анализ тепловых карт показал, что для всех типов диаграмм испытуемые применяли разные механизмы глазодвигательной активности: у секторных диаграмм и столбиковых брусковых рассматривались только меньшие фрагменты (рис. 3 а, в), тогда как в полосовых брусковых диаграммах считывание информации происходило при помощи визуального охвата всей диаграммы (рис. 3 б). В брусковых и кольцевых диаграммах испытуемые рассматривали варианты всех ответов полностью, тогда как во время решения задач с секторными диаграммами основное количество фиксаций приходилось на большее значение у каждого из вариантов ответов.

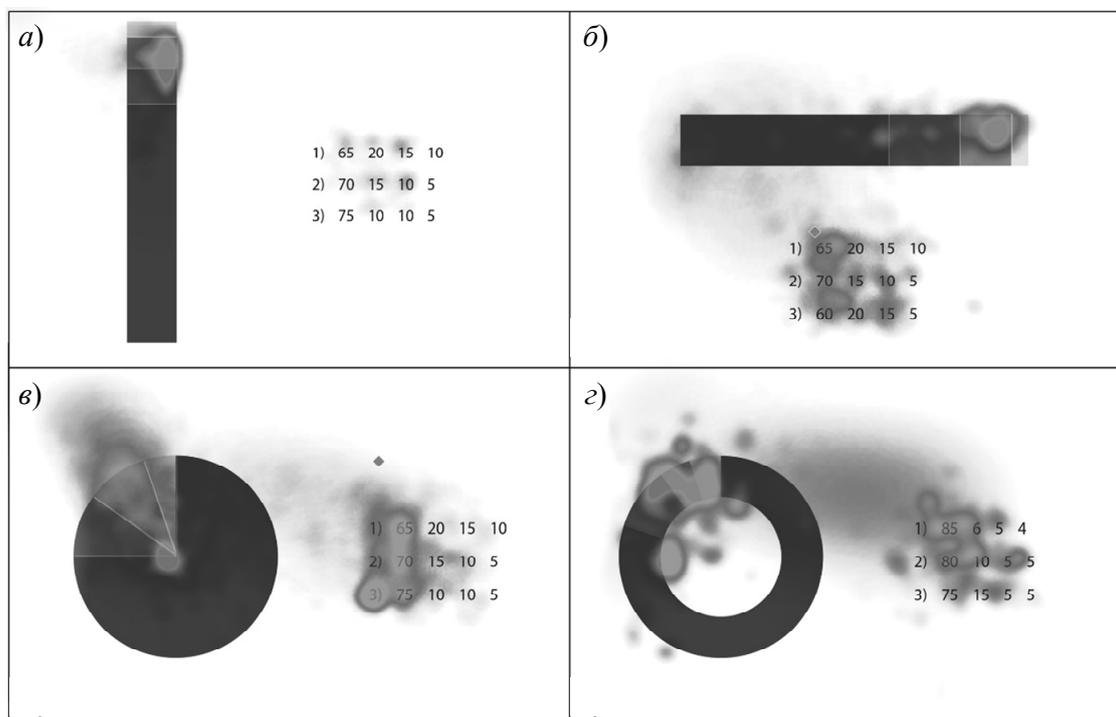


Рис. 3. Тепловые карты: а – столбиковой брусковой диаграммы; б – полосовой брусковой диаграммы; в – секторной диаграммы; з – кольцевой диаграммы

Fig. 3. Heat maps: а – vertical bar chart; б – horizontal bar chart; в – pie chart; з – donut chart

Следует отметить, что оценка тепловых карт показала, что в секторных и кольцевых диаграммах испытуемые ищут визуальные ключи, а иногда даже визуально отмеряют доли на диаграмме, чтобы ее считать и декодировать. Чем сложнее диаграммы с точки зрения близости визуализированных процентных соотношений, тем большее количество испытуемых прибегало к такой стратегии. Испытуемые взглядом обозначали нижний вертикальный радиус и, отталкиваясь от него, отмеряли значения по часовой стрелке.

Интерпретация результатов и выводы

В ходе эксперимента были получены ответы на поставленные вопросы:

RQ 1. Тип графика влияет на время решаемой задачи. Секторные диаграммы в среднем считываются дольше. Порядок следования оттенков цвета графиков влияет на время решаемой задачи только в случае брусковых диаграмм: графы, где большая область обозначена светлым, считываются быстрее.

RQ 2. Тип и порядок следования оттенков цвета графика на правильность решения задачи не влияет.

RQ 3. Тип и порядок следования оттенков цвета графиков на продолжительность фиксации не влияет.

RQ 4. Количество фиксаций возрастает во время считывания информации с секторных диаграмм. В других случаях тип и порядок следования оттенков цвета графиков на количество фиксаций не влияет.

RQ 5. Тип графика влияет на количество саккад: во время работы с секторными диаграммами среднее количество саккад намного больше, чем у других типов диаграмм. Порядок следования оттенков цвета графика на количество саккад не влияет.

RQ 6. Тип графика влияет на паттерн рассматривания. Для каждого типа диаграмм применяется свой паттерн рассматривания. Порядок следования оттенков цвета не влияет на паттерн рассматривания диаграмм.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Для визуализации одиночной статической структуры данных стоит отдавать предпочтение брусковому типу диаграмм. Секторные диаграммы следует выбирать только в том случае, если идет обращение к ассоциативным формам. Использование такого графического образа для визуализации структуры данных диктуется семантическими связями и контекстом использования.

Выбирая между вертикальным и горизонтальными брусковыми диаграммами, дизайнер должен обращаться к семантике контента и композиционным решениям размещения информационной графики, т. к. разница в восприятии информации в этих диаграммах не является статистически значимой. Однако, следует отметить, что паттерн рассматривания полосовых и столбиковых брусковых диаграмм имеет значительные отличия: полосовые диаграммы рассматриваются полностью, от начальной точки до конца, тогда как в столбиковых внимание приходится только на малую область, а остальная часть графика оказывается вне зоны внимания. В обоих случаях глазодвигательная активность концентрируется на меньших долях структуры. Если большая доля окрашена светлее, чем остальные, то такая диаграмма считывается быстрее.

На основе тепловых карт можно предположить, что в секторных диаграммах оценка значений происходит путем вычитания: испытуемые анализировали меньшую область графика и сравнивали с большими значениями в ответах, вычисляя оставшуюся от этих больших значений часть. Об этом свидетельствуют две явные зоны на тепловой карте: внимание на графике приходится на меньшие сегменты, тогда как в вариантах ответов испытуемые рассматривают большее значение. Соответственно, можно предположить, что эффективность секторных диаграмм падает из-за того, что, воспринимая их, пользователи совершают математические вычисления в уме.

Анализ тепловых карт показал, что в секторных диаграммах испытуемые обращают основное внимание на углы, в меньшей степени на дуги. Это утверждение основывается на наличии центральной зоны интереса, в которой происходит считывание угловых значений. Попытки определить угловые параметры долей можно увидеть и в паттерне рассматривания кольцевой диаграммы, хотя и не так выражено. Из этого следует рекомендация оставлять свободным от дополнительных экспликационных или декоративных элементов центр секторной диаграммы и ее кольцевой модификации.

За рамками настоящего исследования остались проблемы цветового кодирования диаграмм, их пропорционального соотношения относительно области листа или кадра, а также эффективности восприятия диаграмм при сравнении нескольких набо-

ров данных или оценки динамики их структуры. Это требует отдельного исследования. Также можно отметить, что испытуемым предлагались относительно несложные диаграммы с наличием доминирующей доли, т. к. основной задачей данного исследования являлось обнаружение общих тенденций во время восприятия разных типов визуализации структуры данных.

Кластерный анализ проводился на основе одного из возможных признаков: координатного расположения фиксаций глазодвигательной активности. В настоящей статье не рассматривалась кластеризация, основанная на принципах оценки близости или порядка следования саккад, продолжительности фиксаций и пр. Использование различных принципов кластерного анализа для обработки данных глазодвигательной активности требует дальнейшего отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Few S.C.** Show me the numbers: Designing tables and graphs to enlighten. 2 ed. Burlingame: Analytics press, 2012. XVIII. 351 p.
2. **Елисеева И.И., Юзбашев М.М.** Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика, 2004. 655 с.
3. **Лаптев В.В., Орлов П.А., Драгунова О.В.** Визуализация динамических структур данных с помощью потоковых диаграмм в веб-аналитике // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 4. С. 7–16. DOI: 10.18721/JCSTCS.10401
4. **Лаптев В.В.** Проектные основы инфографики. М.: АВАТАР, 2016. 287 с.
5. **Karsten K.G.** Charts and graphs: An introduction to graphic methods in the control and analysis of statistics. New York: Prentice-Hall, 1923. XI. 734 p.
6. **Eells W.C.** The relative merits of circles and bars for representing component parts // J. of the American Statistical Association. 1926. Vol. 21. Pp. 119–132.
7. **Croxton F.E., Stein H.** Graphic comparisons by bar, squares, circles, and cubes // J. of the American Statistical Association. 1932. Vol. 27. No. 177. Pp. 54–60.
8. **Cleveland W.S., McGill R.** Graphical perception: Theory, experimentation, and application to the development of graphical methods // J. of the American Statistical Association. 1984. Vol. 79. No. 387. Pp. 531–554.
9. **Cleveland W.S.** The elements of graphing data. NJ: Hobart Press, 1994. 297 p.
10. **Spence I., Lewandowsky S.** Displaying proportions and percentages // Applied Cognitive Psychology. 1991. Vol. 5. Pp. 61–77.
11. **Kosara R., Skau D.** Judgment error in pie chart variations // Proc. of Eurographics Conf. on Visualization (EuroVis). 2016 // URL <http://dx.doi.org/10.2312/eurovisshort.20161167> DOI: 10.2312/eurovisshort.20161167
12. **Cai X., Efstathiou K., Xie. X., Wu Y.** A study of the effect of doughnut chart parameters on proportion estimation accuracy // Computer Graphics Forum. 2018. Vol. 00. Pp. 1–13. DOI: 10.1111/cgf.13325
13. **Bertin J.** Semiology of graphics. Diagrams. Networks. Maps. Redlans: Esri Press, 2011. 438 p.
14. **Лаптев В.В., Орлов П.А.** Кластерный анализ визуального восприятия структуры данных // Бизнес-информатика. 2015. № 3 (33). С. 34–43.
15. **Sharif B., Maletic J.I.** An empirical study on the comprehension of stereotyped UML class diagram

layouts // Proc. of the IEEE 17th Internat. Conf. on Program Comprehension. 2009. Pp. 268–272.

16. **Huang W.** Using eye tracking to investigate graph layout effects // Proc. of the 6th Asia-Pacific Symp. on Visualisation. 2007. Pp. 97–100.

17. **Goldberg J.H., Helfman J.I.** Comparing information graphics: A critical look at eye tracking // Proc. of the 3rd BELIV'10 Workshop: Beyond Time and Errors: Novel Evaluation Methods for Information Visualization. 2010. Pp. 71–78.

18. **Prats M., Garner S., Jowers I., McKay A., Pedreira N.** Interpretation of geometric shapes – an eye movement study // Proc. of the Symp. on Eye-Tracking Research & Applications. 2010. Pp. 243–250.

19. **Duchowski A.** Eye tracking methodology. 3rd ed. Springer, 2017. 408 p.

20. **Ярбус А.Л.** Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 165 с.

21. **Митькин А.А.** Электроокулография в инженерно-психологических исследованиях. М.: Наука, 1974. 141 с.

Статья поступила в редакцию 10.03.2019.

REFERENCES

1. **Few S.C.** *Show me the numbers: Designing tables and graphs to enlighten*. 2 ed. Burlingame: Analytics press, 2012, XVIII, 351 p.

2. **Yeliseyeva I.I., Yuzbashev M.M.** *Obshchaya teoriya statistiki [General theory of statistics]*. Moscow: Finansy i statistika Publ., 2004, 655 p. (rus)

3. **Laptev V.V., Orlov P.A., Dragunova O.V.** Visualization of dynamic data structures with flow charts in web analytics. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, 2017, Vol. 10, No. 4, Pp. 7–16. DOI: 10.18721/JCSTCS.10401 (rus)

4. **Laptev V.V.** *Proyektnyye osnovy infografiki [Infographic Design Basics]*. Moscow: AVATAR Publ., 2016, 287 p. (rus)

5. **Karsten K.G.** *Charts and graphs: An introduction to graphic methods in the control and analysis of statistics*. New York: Prentice-Hall, 1923, XI, 734 p.

6. **Eells W.C.** The relative merits of circles and bars for representing component parts. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, Vol. 21, Pp. 119–132.

7. **Croxtan F.E., Stein H.** Graphic comparisons by bar, squares, circles, and cubes. *Journal of the American Statistical Association*, 1932, Vol. 27, No. 177, Pp. 54–60.

8. **Cleveland W.S., McGill R.** Graphical perception: Theory, experimentation, and application to the development of graphical methods. *Journal of the American Statistical Association*, 1984, Vol. 79, No. 387, Pp. 531–554.

9. **Cleveland W.S.** *The elements of graphing data*. JNJ: Hobart Press, 1994, 297 p.

10. **Spence I., Lewandowsky S.** Displaying proportions and percentages. *Applied Cognitive Psychology*, 1991, Vol. 5, Pp. 61–77.

11. **Kosara R., Skau D.** Judgment error in pie chart variations. Proceedings of Eurographics Conference on Visualization (EuroVis). 2016. Available: <http://dx.doi.org/10.2312/eurovisshort.20161167> DOI: 10.2312/eurovisshort.20161167

12. **Cai X., Efstathiou K., Xie X., Wu Y.** A study of the effect of doughnut chart parameters on proportion estimation accuracy. *Computer Graphics Forum*, 2018, Vol. 00, Pp. 1–13. DOI: 10.1111/cgf.13325

13. **Bertin J.** *Semiology of graphics. Diagrams. Networks. Maps*. Redlans: Esri Press, 2011, 438 p.

14. **Laptev V.V., Orlov P.A.** Klasternyi analiz vizual'nogo vosprijatija struktury dannyh [Cluster analysis of visual perception of data structure]. *Business Informatics*, 2015, Vol. 3 (33), Pp. 34–43. (rus)

15. **Sharif B., Maletic J.I.** An empirical study on the comprehension of stereotyped UML class diagram layouts. *Proceedings of the IEEE 17th International Conference on Program Comprehension*, 2009, Pp. 268–272.

16. **Huang W.** Using eye tracking to investigate graph layout effects. *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Symposium on Visualisation*, 2007, Pp. 97–100.

17. **Goldberg J.H., Helfman J.I.** Comparing information graphics: a critical look at eye tracking. *Proceedings of the 3rd BELIV'10 Workshop: Beyond Time and Errors: Novel Evaluation Methods for Information Visualization*, 2010, Pp. 71–78.

18. **Prats M., Garner S., Jowers I., McKay A., Pedreira N.** Interpretation of geometric shapes – an eye movement study. *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications*, 2010, Pp. 243–250.

19. **Duchowski A.** *Eye tracking methodology*. 3rd ed. Springer, 2017, 408 p.

20. **Yarbus A.L.** *Rol dvizheniy glaz v protsesse zreniya* [The role of eye movements in the process of vision]. Moscow: Nauka Publ., 1965, 165 p. (rus)

21. **Mitkin A.A.** *Elektrookulografiya v inzhenerno-psikhologicheskikh issledovaniyakh* [Electroculography in engineering and psychological research]. Moscow: Nauka Publ., 1974, 141 p. (rus)

Received 10.03.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЕРМОЛОВА Татьяна Константиновна

ERMOLOVA Tatiana K.

E-mail: togatsbp@gmail.com

ИВАЩЕНКО Полина Денисовна

IVASCHENKO Polina D.

E-mail: deadpolonium@yandex.ru

ЛАПТЕВ Владимир Владимирович

LAPTEV Vladimir V.

E-mail: laptevsee@yandex.ru