

Московский городской психолого-педагогический университет
Центр экспериментальной психологии

В. А. Барабанщиков,
А. В. Жегалло

АЙТРЕКИНГ

**Методы регистрации движений глаз
в психологических исследованиях и практике**

Когито-Центр
Москва – 2014

УДК 159.9
ББК 88
Б 24

*Все права защищены. Любое использование материалов
данной книги полностью или частично
без разрешения правообладателя запрещается*

Рецензенты:

Б. М. Величковский, член-корр. РАН,
доктор психол. наук, профессор

В. И. Белопольский, доктор психол. наук, профессор

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН

В. А. Барabanщиков, А. В. Жегалло

Б 24 Айтрекинг: Методы регистрации движений глаз в психологических исследованиях и практике. – М.: Когито-Центр, 2014. – 128 с. (Университетское образование)

ISBN 978-5-89353-415-3

УДК 159.9
ББК 88

Учебное пособие посвящено методам измерения направленности зрения человека. В последние годы, благодаря появлению удобных средств видеорегистрации движений глаз – айтрекеров – их применение в фундаментальных и прикладных исследованиях становится все более доступным. В книге рассматриваются виды движений глаз и их характеристики, феномены окуломоторной активности человека и ее детерминанты, роль движений глаз в процессах познания, деятельности и общения; обсуждаются достоинства и недостатки методов окулографии, дается характеристика современного оборудования и технологий регистрации движений глаз. Учебное пособие предназначено для магистрантов и аспирантов психологических факультетов (кафедр) вузов, специализирующихся по направлениям «Экспериментальная психология», «Когнитивная психология», «Прикладная психология», «Психофизиология», «Клиническая психология».

*На обложке представлен маршрут движений глаз человека,
рассматривающего репродукцию картины Сальвадора Дали
«Незримые лев, конь и спящая женщина» (1930 г.).*

© Московский городской психолого-педагогический
университет, 2014

ISBN 978-5-89353-415-3

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 5 |
| ГЛАВА 1 | |
| Движения глаз как научная проблема | 7 |
| Краткая история | 7 |
| Проблемное поле | 9 |
| ГЛАВА 2 | |
| Глазодвигательная активность | 12 |
| Орган зрения | 12 |
| Виды движений глаз | 14 |
| Глазодвигательная система | 19 |
| Понятие взора | 21 |
| ГЛАВА 3 | |
| Методы регистрации движений глаз | 23 |
| Видеосъемка | 23 |
| Фотооптический метод | 25 |
| Фотоэлектрический метод | 29 |
| Электроокулография | 32 |
| Электромагнитный метод | 36 |
| ГЛАВА 4 | |
| Общая характеристика исследований окуломоторной активности человека | 41 |
| Фундаментальная проблема | 42 |
| Практические приложения | 43 |
| Требования к организации исследований | 44 |
| ГЛАВА 5 | |
| Психологическая природа окуломоторной активности | 46 |
| Окуломоторные структуры | 47 |
| Детерминанты движений глаз | 50 |
| Механизмы регуляции | 54 |
| ГЛАВА 6 | |
| Цифровые системы видеорегистрации движений глаз | 58 |
| Принципы работы | 58 |
| Источники помех | 60 |

ГЛАВА 7

| | |
|--|----|
| Оборудование для видеорегистрации движений глаз | 63 |
| Стационарные системы | 63 |
| Мобильные системы | 69 |
| Безопасность использования систем видеорегистрации движений глаз. | 73 |

ГЛАВА 8

| | |
|---|----|
| Предъявление стимульного материала. | 76 |
| Стандартное и альтернативное программное обеспечение | 76 |
| Средства создания экспериментов в программно-аппаратных комплексах | 78 |
| Айтрекинг-исследования зрительного восприятия объектов, зависящих от направления взгляда (gaze contingent paradigm) | 82 |

ГЛАВА 9

| | |
|---|----|
| Обработка данных. | 84 |
| Первичная обработка данных | 85 |
| Дифференциация фиксаций и саккад. | 86 |

ГЛАВА 10

| | |
|---|-----|
| Показатели окуломоторной активности. | 89 |
| Показатели, связанные с непосредственным перемещением глаз | 89 |
| Показатели, связанные с устойчивым положением взгляда | 94 |
| Численные (частотные) показатели | 100 |
| Показатели, связанные с инерционностью движений | 105 |
| Практика обработки айтрекинг-данных. | 108 |

ГЛАВА 11

| | |
|--|-----|
| Айтрекинг в структуре экспериментально-психологических исследований | 110 |
| Переоснащение инструментально-технологической базы психологии | 110 |
| Специфика предмета психологического исследования | 112 |
| Новые технологии и перспективы изучения окуломоторной активности человека. | 114 |
| Литература | 117 |

ПРИЛОЖЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Учебно-методический комплекс по курсу «Методы регистрации движений глаз в психологии» | 120 |
|--|-----|

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие, предлагаемое вниманию читателя, посвящено измерениям направленности взора человека и их использованию в психологической науке и практике. Потребность в данной тематике обусловлена местом движений глаз в структуре взаимоотношений индивида со средой, человека с миром. Тесные связи окуломоторики с центральной нервной системой, с одной стороны, с содержанием психических процессов – с другой, с многообразными формами активности субъекта (поведением, деятельностью, общением) – с третьей, позволяют через анализ движений глаз изучать механизмы работы мозга и их нарушения, выявлять динамику состояний, закономерности восприятия, мышления, представлений, проследить намерения и установки личности. Знания о движениях глаз используются в интересах многих профессий.

В последние годы окуломоторная тематика стала очень популярной. В развитых странах Европы и Америки число исследований, использующих движения глаз в качестве индикатора состояний, психических процессов и поведения людей, растет по экспоненте. Интерес к окуломоторной активности вновь пробуждается в России. Переживаемый бум связан с появлением удобных средств регистрации направленности взора (айтрекеров) и программных продуктов, позволяющих эффективно обрабатывать окулограммы. Складывается новый термин, фиксирующий наряду с инструментальной и измерительной, информационно-коммуникативную и интерпретационную составляющие видеоокулографии – айтрекинг.

Учебное пособие адресовано в первую очередь магистрантам и аспирантам психологических кафедр университетов, которые знакомятся с современными методами объективного изучения поведения человека и, возможно, пытаются использовать окулографию в своей работе. На сегодняшний день айтрекинг представляет

собой сложную систему процедур, связывающую оборудование, необходимое для регистрации окуломоторной активности, способы предъявления стимульного материала, компьютерную обработку данных, их оценку и интерпретацию. На любом из этапов применения айтрекера исследователь либо практик сталкивается с множеством вопросов, без решения которых получаемые результаты могут оказаться некорректными.

Назначение пособия состоит в том, чтобы помочь заинтересованному читателю сориентироваться как в методах окулографии, так и в области содержательных проблем, касающихся психологической природы движений глаз. Читатель имеет возможность познакомиться с видами движений глаз и их характеристиками, феноменами окуломоторной активности и ее ключевыми детерминантами, механизмами и ролью движений глаз в процессах восприятия, деятельности и общения. Значительное место в книге уделено конкретным методам окулографии, описываются характеристики современного оборудования и технологий регистрации и оценки движений глаз. В приложении к пособию дается учебно-методический комплекс по курсу «Методы регистрации движений глаз в психологии», апробированный в Центре экспериментальной психологии Московского городского психолого-педагогического университета.

Исследования окуломоторной активности – ее механизмов, свойств, функций – одна из немногих экспериментальных областей психологии, результатами разработки которой российская наука может гордиться. Хотелось бы надеяться, что на очередном витке развития технологий заложенные ранее традиции будут упрочены и позволят существенно расширить наши представления об организации движений глаз и их роли в процессах познания, деятельности и общения людей.

ДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ КАК НАУЧНАЯ ПРОБЛЕМА

В повседневной жизни каждый человек, обладающий зрением, постоянно осматривает окружающее, выделяя для себя ту или иную полезную информацию. Мы всегда что-то ищем и замечаем в мире: цвет светофора, мелькнувшее в толпе лицо, вульгарно-оригинальный текст рекламы или контуры строящегося здания. Дважды в секунду предмет зрительного восприятия меняется, а направленность взгляда перемещается из одной позиции в другую. Какова природа подобных движений? Зачем они нужны? Можно ли их измерить и насколько точно? Как они организованы? От чего зависят? Как включаются в процесс ориентировки человека в мире? О чем могут информировать? Как связана направленность взгляда с поведением, деятельностью и общением? Вот круг основных вопросов, обозначающих проблемное поле исследований и диапазон практического использования получаемых результатов.

Краткая история

Функции движений (направленности) глаз человека обсуждаются на протяжении нескольких столетий. В разные годы в дискуссию включались крупнейшие естествоиспытатели, такие как И. Кеплер и И. Ньютон, Г. Гельмгольц и И. М. Сеченов. Связь движений глаз с восприятием произведений искусства отмечали Леонардо да Винчи, А. Дюрер, О. Роден. Конструктивный характер окуломоторики подчеркивался в эпистемологических концепциях Дж. Беркли, Т. Гоббса, Р. Декарта, Э. Кондильяка, Ж. Ламетри, Дж. Локка, Н. Мальбранша и других философов. Свое отношение к природе и функциям движений глаз выразили ведущие психологические течения: физиологическая психология, структурализм, гештальт-

психология, бихевиоризм, генетическая психология, когнитивная психология, сторонники экологического, деятельностного, системного и других подходов.

Хотя активное использование окулографии началось пятьдесят лет назад, экспериментальное изучение направленности/движений взора человека ведется с середины XIX в. Смены школ и научных традиций отточили инструментарий исследований; дифференцировались основные предметные области, система понятий, парадигмы и спектр решаемых проблем. На сегодняшний день совокупный объем разработок темы достаточно высок. Вопросы окуломоторной активности неизменно встают на международных психологических и физиологических конгрессах, съездах, конференциях; им посвящены крупные монографические издания. Образованная в 1979 г. Европейская группа исследователей движений глаз объединяет представителей десятков научных центров Европы, США и ряда стран Азии. С 2007 г. выходит специализированный журнал, посвященный вопросам природы и функций движений глаз, – «Journal of Eye Movement Research».

Проблема движений глаз, их роли в процессах познания, деятельности и общения имеет в российской науке глубокие корни и серьезный методический задел. Необходимость измерения направленности взора была осознана еще в XIX столетии. Первоначально это достигалось с помощью субъективных процедур: путем сравнительной оценки наблюдателем относительного положения или величины воспринимаемых предметов, обнаружения смещений послеобраза или описания особенностей энтоптических явлений. Непосредственно перед Великой Отечественной войной проводились аппаратурные наблюдения за движениями глаз. Объективные методы, позволяющие вести измерения глазодвигательной активности в ходе выполнения испытуемым различных задач (собственно окулография), стали разрабатываться в 1950-х годах и уже в 1960–1970-е годы получили широкое распространение (Ярбус, 1965; Запорожец, Венгер, Зинченко, Рузская, 1967; Гуревич, 1971; Зинченко, Вергилес, 1969; Ломов, Вергилес, 1975; Гиппенрейтер, 1978; и др.). Социальные потрясения конца столетия отодвинули аппаратурные исследования на дальний план. Интерес к тематике возрождается лишь в XXI веке; благодаря прогрессу информационных технологий обнаруживаются дополнительные возможности окулографии не только в области фундаментальной науки, но и в различных сферах практики.

Проблемное поле

Исключительное значение, придаваемое столь специфичному виду активности, обусловлено местом, которое он занимает в структуре взаимоотношений человека с миром. Воплощая единство важнейших сфер жизни – ориентировки, коммуникации и движения, окуломоторная активность оказывается на пересечении процессов познания, деятельности и общения, природа которых всегда вызывает повышенный интерес.

Взятая сама по себе, окуломоторика выступает как яркий феномен биодинамики, характеризующийся многообразием видов и переходных форм. В каждый момент времени глаза человека находятся в движении. Быстрые резкие перемещения (саккады) сменяются медленными и плавными (дрейфом), почти точное прослеживание движущегося объекта сочетается с собственными колебаниями глаз (тремором); наряду с латеральными отклонениями (право–лево, верх–низ) выполняются вращательные движения относительно оптической оси (торзии), а при бинокулярном восприятии – сведение или разведение самих осей (вергенция); диапазон амплитудно-частотных характеристик окуломоторной активности занимает несколько порядков. Способы построения подобных движений и их синтеза образуют содержание проблем, далеко выходящих за рамки биомеханики.

Оставаясь уникальным проявлением «живого движения» (Н. А. Бернштейн), окуломоторика подчинена общим законам организации двигательной активности. С этой точки зрения, движения глаз можно рассматривать как элементарную модель поведенческих актов, реализующую структуру и ключевые механизмы взаимодействия организма со средой. Взаимосвязь окуломоторики с различными отделами и системами мозга открывает перспективу исследования разнообразных процессов ЦНС, которые обеспечивают ориентировку организма в среде и организацию его поведения. В отличие от других объектов биологического регулирования направленность/движение глаз имеет неоспоримые преимущества: небольшое число степеней свободы, доступность прямому наблюдению и возможность непрерывной регистрации.

Наиболее тесно окуломоторика включена в процесс зрительного восприятия. Именно здесь появляется понятие взора, выражающее одновременно предметную направленность и активность наблюдателя; первая связана с устойчивой фиксацией глаз, вторая – с их перемещением из одной позиции в другую. Являясь условием адекватного отражения действительности, направленность/двиге-

ния глаз объективируют этот процесс: вводят в него соразмерность пространственно-временным отношениям среды и связывают его с событиями, протекающими в самом организме. Возможность объективации предмета восприятия является тем смысловым ядром, которое на протяжении веков порождает и поддерживает разнообразные гипотезы о роли движений глаз в чувственном познании мира. И хотя вопрос о функциях окуломоторики до сих пор остается открытым, его решение нередко рассматривается как ключ к природе зрительного восприятия в целом.

Направленность взора – важная функциональная характеристика человека, выражающая его отношение к окружающей среде. Она проявляется в направленности оптических осей глаз, но к ней не сводится. Даже во время устойчивой фиксации предмета оптические оси находятся в непрерывном движении, перемещаясь по замысловатой траектории. Главная функция окуломоторной активности состоит в обеспечении зрительного процесса, создании эффективных условий восприятия среды.

Через восприятие окуломоторика связана с другими психическими процессами и затрагивает состояния человека. Так или иначе характер перемещения глаз выражает динамику внимания, мышления, воображения, представления, а их направленность – актуальные интенции личности: интерес, намерение, установку, отношение. Путем анализа движений глаз открывается возможность объективного исследования разнообразных психических явлений.

Психические процессы и состояния, в свою очередь, включены в более широкий контекст взаимоотношений человека с миром (деятельность, поведение, общение, игру) и сами строятся по логике этих взаимоотношений. Поэтому в формах окуломоторной активности находят отражение как динамика выполняемого действия, так и его структурные образующие. Это позволяет использовать знания о движениях глаз в интересах многих профессий.

В практическом плане закономерности окуломоторной активности учитываются при проектировании технических систем отображения информации, сложных видов профессиональной деятельности и оценке интерфейсов компьютеров, расширяют горизонты диагностики локальных поражений мозга, используются для лечения последствий психотравмы и при организации контроля за формированием умственных действий, составляют основу методов коррекции зрительных и окуломоторных функций и т. п. Психология, нейронаука, эргономика, офтальмология, радиология, спорт, педагогика, психиатрия, авиация, космонавтика, техническое моделирование биологических систем, масс-медиа, сценическое искусство

во, публичная политика, PR, реклама – далеко не полный перечень сфер применения результатов исследований направленности/движений взора человека.

Аккумулируя понятия, методы и экспериментальные данные ряда научных дисциплин (биомеханики, информатики, физиологии сенсорных систем, психологии зрительного восприятия, искусственного интеллекта, офтальмологии и др.), проблема движений глаз принадлежит к числу комплексных. Она поставлена в нескольких планах: 1) феномены окулоmotorной активности (виды, формы и параметры движений глаз); 2) их детерминация (условия, факторы и предпосылки, определяющие характеристики движений глаз); 3) управление окулоmotorной активностью (механизмы движений глаз), 4) развитие окулоmotorной активности (фило-, онто-, актуал- и патогенез глазодвигательной системы); 5) способы включения окуломоторики в процессы зрительного восприятия, познания, общения и деятельности человека, и некоторые другие. Каждый из планов фиксирует главные предметные области проблемы и опирается на соответствующую систему познавательных средств. Раскрывая разные аспекты одного и того же целого они тесно взаимосвязаны; с какого бы плана и в рамках какой бы дисциплины ни начиналось исследование, рано или поздно возникает необходимость преодоления рамок исходной парадигмы и выхода в другие планы анализа или смежные области знания.

Глава 2

ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ

В процессе эволюции глаза формировались как органы зрения, обеспечивающие организм дистантную ориентацию в оптически разнородной среде. По своему строению и способу функционирования – это уникальные устройства преобразования светового потока в активность нервной ткани, которая лежит в основе разнообразных психических явлений: зрительных ощущений, восприятий, внимания, представлений и т. п.

Орган зрения

Внешний вид глаза человека изображен на рисунке 1. Конъюнктивa – белая соединительная ткань, пронизанная мелкими кровеносными сосудами, в передней части глазного яблока переходит в более изогнутую и прозрачную роговицу. Позади роговицы располагается пигментированная (серая, синяя или каряя) радужная оболочка, обрамляющая зрачок. В зависимости от интенсивности светового потока диаметр зрачка может меняться. Конъюнктивa и роговица покрыты тонкой пленкой слезной жидкости, которая равномерно распределяется при движении век (моргании). Слезная жидкость

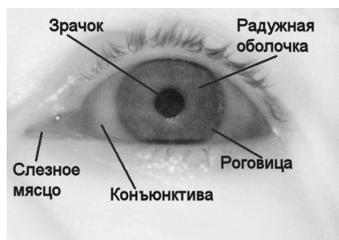


Рис. 1. Внешний вид глаза человека

улучшает оптические свойства поверхности роговицы, выполняет роль смазки и защищает глаз от проникновения инфекции.

Оптическая система глаза представляет собой неточно сфокусированную систему линз, которая формирует перевернутое, сильно уменьшенное и искаженное изображение (ретинальный образ) источников света. Отраженный свет проникает в глаз сквозь роговицу, проходит через хрусталик, обладающий способностью менять преломляющую силу, стекловидное тело (желеподобную жидкость, заполняющую глаз), сложную сеть кровеносных сосудов, дендритов и аксонов нейронов, попадая, наконец, на светочувствительную поверхность сетчатки (рисунок 2). Именно здесь происходит первичная обработка оптической информации и посылаются соответствующие сигналы в вышележащие отделы центральной нервной системы.

Светочувствительные клетки (рецепторы) распределены по поверхности сетчатки неравномерно. Наиболее плотно они сосредоточены в небольшой ($1,3^\circ$) области около пересечения плоскости сетчатки с оптической осью глаза. Данная область – *fovea centralis* – обеспечивает наивысшую разрешающую способность глаза. С увеличением эксцентриситета плотность рецепторов постепенно падает, а разрешающая способность глаза уменьшается. Исключение составляет небольшая область вхождения зрительного нерва в глазное яблоко – слепое пятно ($16-18^\circ$ по горизонтальному меридиану назальной части сетчатки). Она лишена фоторецепторов и неспособна вызвать зрительный процесс. Сетчатка каждого глаза обеспечивает возможность восприятия ахроматических объектов в зоне около 150° (по горизонтали) и 130° (по вертикали), при этом центр поля зрения смещен к назальной части примерно на 15° .

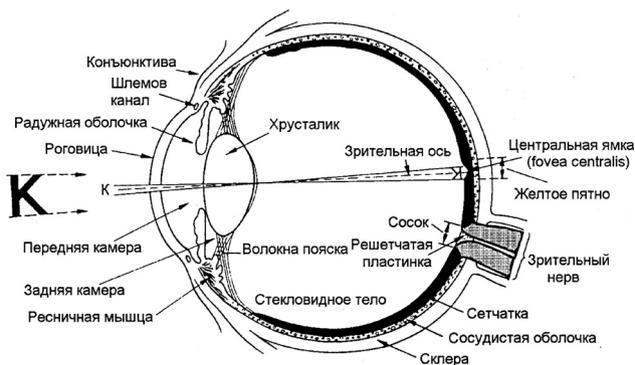


Рис. 2. Строение глаза (Грюссер, Грюссер-Корнельс, 1984)

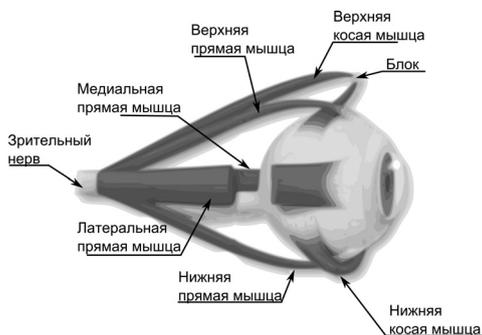


Рис. 3. Мышечный аппарат глаза

С неоднородностью разрешающей способности тесно связано другое свойство глаза – мобильность, или изменение местоположения в орбите. Глаз выступает как орган движения, посредством которого осуществляется поиск необходимого объекта, его выделение из фона, рассматривание или «мысленное преобразование». Это обстоятельство позволяет использовать параметры направленности/движений взора в качестве индикаторов перцептивного процесса и связанных с ним форм активности субъекта.

Глаз человека приводится в движение шестью наружными мышцами, укрепленными в глазной впадине (рисунок 3). Несмотря на отсутствие центра подвеса или физической оси вращения, глазное яблоко вращается относительно постоянного центра, расположенного внутри глаза на зрительной оси. Расстояние между вершиной роговицы и центром вращения глаза приблизительно равно 13,5 мм.

Виды движений глаз

Известны восемь основных видов движений глаз: тремор, дрейф, микро- и макросаккады, прослеживающие вергентные, торзионные движения и нистагм. Каждый из них обладает характерными биомеханическими свойствами (амплитудой, скоростью, частотой, траекторией и т. д.) и подчинен соответствующей системе контроля.

Тремор – мелкие, частые колебания глаз (рисунок 4). Средняя амплитуда – 20–40", частота – до 250–270 Гц. В результате тремора ось глаза описывает эллипсоподобные фигуры. Тремор – естественный двигательный фон окуломоторной активности, неподдающийся произвольному контролю.

Дрейф – медленное, плавное перемещение глаза, прерываемое микросаккадами (рисунок 5а). Скорость дрейфа меняется от 0

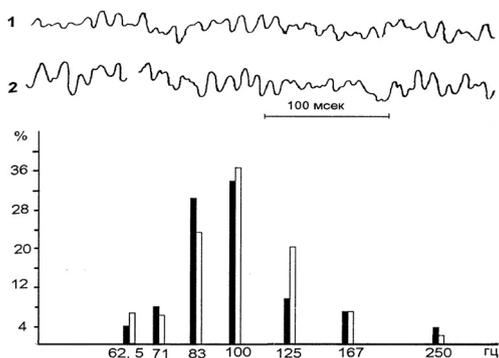


Рис. 4. Тремор глаз в норме (Шахнович, 1974)

1 – треморограмма правого глаза; 2 – треморограмма левого глаза; внизу гистограмма тремора правого (черные столбики) и левого (белые столбики) глаз; по оси ординат – процентное соотношение отдельных частот в спектре тремора; по оси абсцисс – в логарифмическом масштабе частота тремора в Гц.

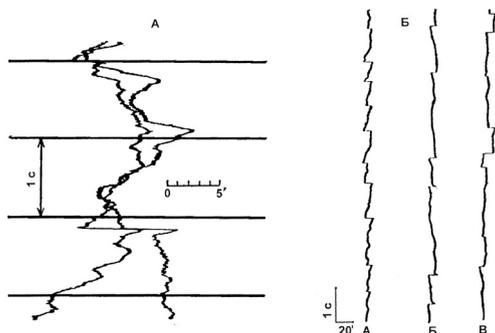


Рис. 5. А – окулограмма движений (горизонтальная составляющая) двух глаз в процессе фиксации испытуемым неподвижной точки. На записи хорошо видна асинхронность дрейфов глаз и тремор (Ярбус, 1965). Б – фиксационный нистагм у трех различных испытуемых: а – «правосторонний»; б – «левосторонний»; в – «центральный» (Гиппенрейтер, 1978)

до 40°/с, длительность – от 30 до 5000 мс. При фиксации объекта на дрейф приходится 97% времени. Считается, что дрейф создает наиболее благоприятные условия для приема и переработки оптической информации.

Микросаккады – быстрые резкие движения продолжительностью 10–20 мс. Диапазон амплитуд – 2–50', скорость от 3 до 12°/с.

Микросаккады плохо поддаются произвольному контролю, появляясь во время фиксации объектов. Периодические «сплывы» глаз, компенсируемые микросаккадами, образуют самостоятельную двигательную единицу – *физиологический нистагм*.

Тремор, дрейф и малоамплитудные саккады относят к категории микродвижений глаз, противопоставляя их макродвижениям: крупноамплитудным саккадам, прослеживающим (следящим) и вергентным движениям. Если микродвижения связаны преимущественно с сохранением, то макродвижения – с изменением положения глаз в орбитах.

Макросаккады – резкие изменения позиции глаза, отличающиеся высокой скоростью и точностью (рисунок 6). Амплитуда саккад варьирует в широких пределах от 40–50' до 50–60°, но в естественных условиях восприятия редко превышает 20°. Продолжительность, скорость и ускорение саккад зависят от их амплитуды. Скорость саккады плавно достигает максимума (примерно в середине пути) и затем плавно убывает до 0. Максимальная скорость двадцатиградусного скачка – 450°/с, его продолжительность – 70 мс. Средняя частота саккадических движений – 2–3 Гц. Как правило они совершаются по кратчайшей прямой между смежными точками фиксации, но в принципе их траектория может иметь синусоидальную, крючкообразную и другие неправильные формы. Саккады возникают при смене точек фиксации, например, во время рассматривания картины, поиска заданного объекта, пересчета элементов и др., и обычно носят произвольный характер (имеется в виду произвольность выбора наблюдателем нового объекта фиксации; произвольно изменить продолжительность, скорость или ускорение макросаккады невозможно). В момент скачка складываются наименее благоприятные условия для получения оптической информации (эффект «саккадического подавления»).

Прослеживающие (следящие) движения – плавные перемещения глаз, возникающие при движении объекта в поле зрения (рисунок 7). Они обеспечивают сохранение его изображения в зоне наилучшего видения.

Прослеживающие движения глаз появляются непроизвольно через 150–200 мс после начала движения объекта и продолжают в течение 300 мс после его остановки или исчезновения. Основной диапазон скоростей – 5–90°/с. Амплитуда движений ограничивается пределами моторного поля глаза (около $\pm 60^\circ$ по горизонтали и $\pm 40^\circ$ по вертикали). За небольшим исключением вызвать прослеживающие движения произвольно (например, по представлению движущегося объекта) невозможно. Прослеживающие движения глаз

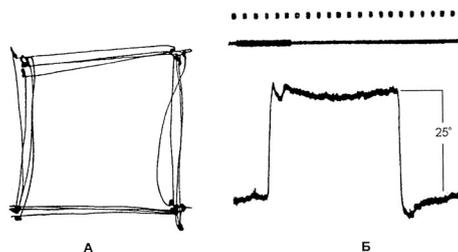


Рис. 6. Примеры макросаккад. А – запись скачков глаз между углами квадрата на неподвижную светочувствительную бумагу (Ярбус, 1965). Б – электроокулограмма фиксационного поворота глаз: последовательная фиксация верхней и нижней светящихся точек (Гуревич, 1971)

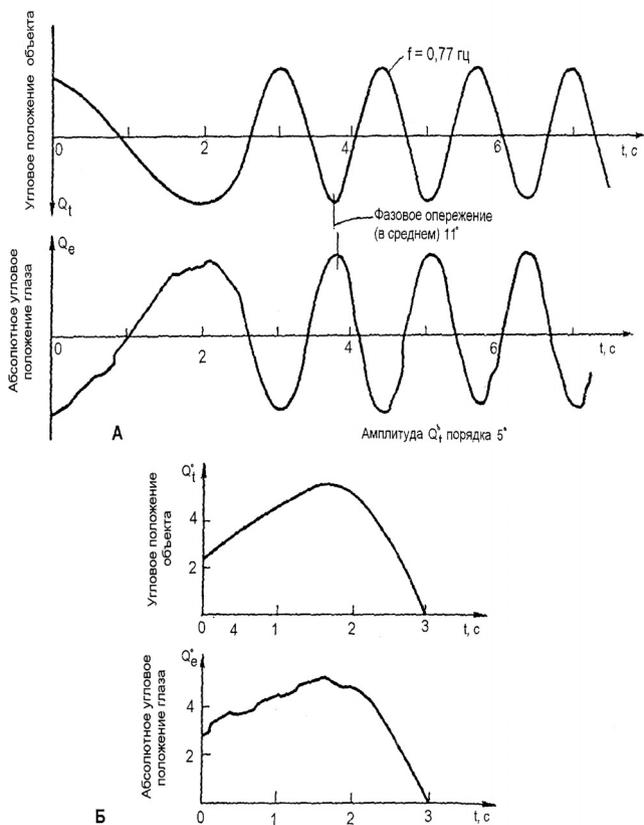


Рис. 7. Режим плавного слежения за перемещающейся точкой: А – предсказуемая траектория; Б – непредсказуемая траектория (часть параболы) (Милсум, 1968)

существенно расширяют диапазон скоростей движения объектов, в котором сохраняется возможность эффективного восприятия. Другим источником плавных движений глаз являются повороты головы. Однако в этом случае параметры движений глаз могут вообще не зависеть от свойств оптической стимуляции (они сохраняются и в темноте).

Вергентные движения – сведение (конвергенция) или разведение (дивергенция) оптических осей глаз (рисунок 8). Они включены в процесс бинокулярного зрения, обеспечивая необходимое соответствие проекций объекта на сетчатках обоих глаз: при фиксации зрительные оси пересекаются на наблюдаемом объекте. Стимулом вергентных движений является диспаратность и диплопия (раздвоение) изображений нового объекта фиксации, вследствие раздражения несимметричных областей сетчаток. Движения возникают через 200 мс после появления объекта и продолжаются несколько сот миллисекунд. Они носят преимущественно плавный характер с максимальной скоростью в несколько десятков угловых градусов в секунду. В момент конвергенции (дивергенции) зрительная способность глаз сохраняется.

Торзионные, или ротационные движения – вращательные перемещения глаз относительно оптической оси (рисунок 9). Они со-



Рис. 8. Вергентные движения глаз при смене точек фиксации (Ярбус, 1965)

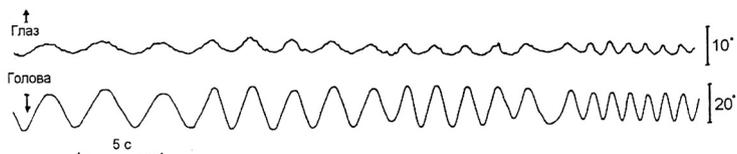


Рис. 9. Запись ротационных движений глаз (вверху) при наклонах головы из стороны в сторону (внизу). Стрелки указывают направление против часовой стрелки (Белопольский, Вергилес, 1990)

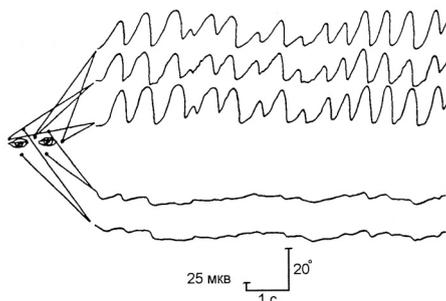


Рис. 10. Оптикинетический нистагм

Три верхние кривые – запись горизонтальных движений глаз: для правого глаза, для левого глаза, для обоих глаз одновременно; две нижние кривые – запись вертикальных движений правого и левого глаза. Видна четкая синхронность всех 3 кривых записи горизонтальных движений глаз. На вертикальные каналы горизонтальные движения глаз почти не передаются. Амплитуда нистагма колеблется в пределах $18-16-5^\circ$. Ритм – 22 удара за 10 с. (Благовещенская, 1968).

держат как саккадический, так и плавный компонент; амплитуда движений ограничена 10° . Основное назначение – частичная компенсация наклонов головы относительно гравитационной вертикали.

Нистагм – устойчивая окуломоторная структура, включающая чередование саккад и плавных прослеживающих движений (рисунок 10). Амплитуда, частота и форма нистагма широко варьируют в пределах параметров базовых видов движений и зависят от его природы; нистагм может иметь оптическое (например, оптикинетический нистагм), эхоическое (вестибулярный нистагм), центральное (виды врожденного нистагма) происхождение. Функция нистагма – компенсация нарушений зрительной и вестибулярной систем или сохранение эффективности восприятия элементов движущейся среды, имеющей регулярную структуру.

Глазодвигательная система

Рассмотренные виды окуломоторной активности скоординированы в пространстве и времени и реализуются параллельно (за исключением тремора и дрейфа) каждым из глаз. Более того, они согласованы с другими моторными процессами, протекающими как в самом глазу (изменение кривизны хрусталика, диаметра зрачка, ширины глазной щели), так и в других системах организма (движения головы, рук, локомоции). За каждым видом движений и их синтезами стоит некоторое целое, включающее наряду с эффекторами рецеп-

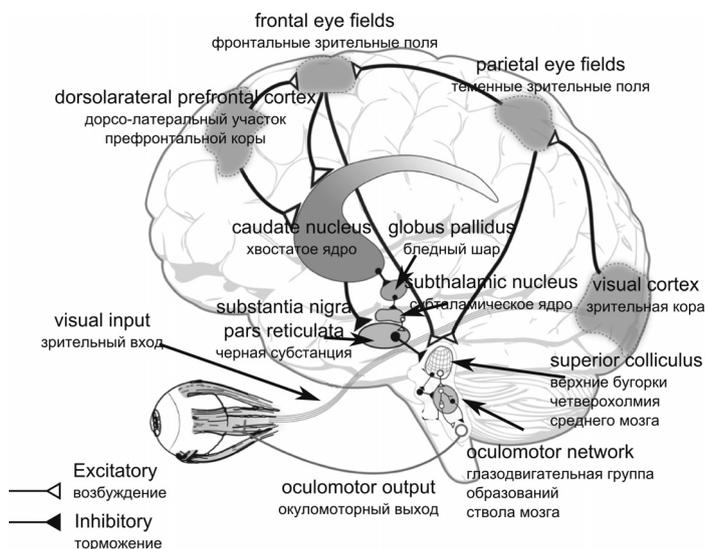


Рис. 11. Схематическое изображение глазодвигательной системы человека (Sharma et al., 2011)

торные аппараты (сетчатка, лабиринт, мышечные веретена) и контролирующие инстанции ЦНС (верхние бугорки четверохолмия, ядра наружного коленчатого тела, мозжечок, зрительная и лобная области коры и др.) (рисунок 11).

Подобное объединение на основе общей функции – изменения либо сохранения положения глаз в орбитах – получило название *глазодвигательной системы* (ГДС). По способу функционирования она относится к системам управления с отрицательной обратной связью, т. е. реагирует на рассогласование между требуемым и действительным положением глаз. В зависимости от каналов афферентно-эфферентного взаимодействия и ведущего принципа управления в рамках ГДС дифференцируются subsystemы, ответственные за выполнение отдельных видов движений. К ним относятся, в частности, «саккадическая» и «плавная прослеживающая» subsystemы; первая стимулируется позиционной ошибкой локализации объекта относительно направления глаз, вторая – векторной скоростью воспринимаемого объекта. Очевидно, что анализ окуломоторной активности – путь, ведущий к пониманию принципов и механизмов биологических систем регулирования, разновидностью которых является ГДС, роли движений глаз в процессе зрения, а также к диагностике функционального состояния различных отделов зрительной системы и ее связей.

Понятие взора

На уровне психической организации индивида движения глаз включены в процессы познания, деятельности и общения (рисунок 12). Человек не только принимает и перерабатывает зрительную информацию, но так или иначе относится к ней. Активное познавательное отношение к воспринимаемому находит выражение в феномене взора – визуальной направленности субъекта на определенный элемент или отношение наличной ситуации, которая проявляется в соответствующей ориентации оптических осей глаз. В зависимости от степени включенности человека в ситуацию взор может быть «осмысленным» или «отсутствующим»; в зависимости от площади предмета зрительного восприятия – «тупым» или «острым»; в зависимости от степени информационной загруженности – «пристальным» или «скользящим»; в условиях невербального общения он может выполнять функцию знака: указывать партнеру направление движения либо предмет, свойства которого необходимо учесть. В любом случае это показатель некоторой внутренней работы человека, его актуального состояния или намерения.

Реализуя взаимодействие человека с миром (деятельность, общение, учение, игру) движения глаз приобретают статус операций и действий, т. е. оформляются в целостные окуломоторные образования (структуры), которые побуждаются определенным мотивом, ориентированы на достижение конкретной цели, соотносятся

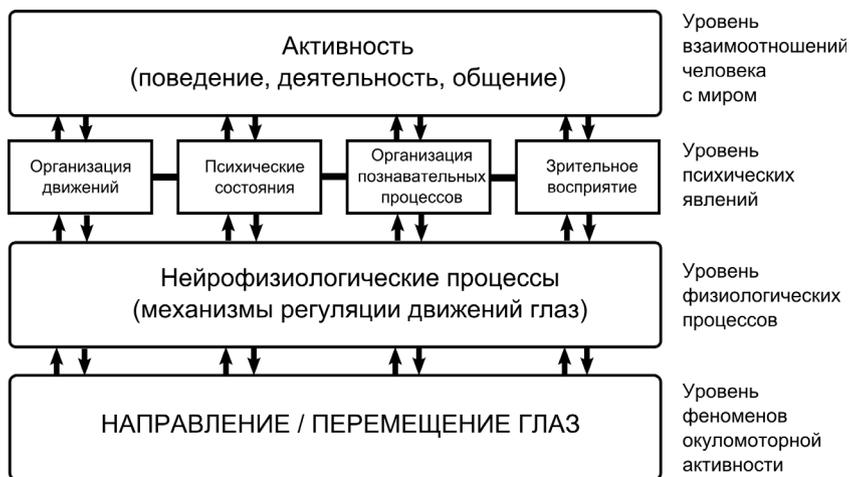


Рис. 12. Основные уровни и каналы связи активности человека с движениями его глаз

с условиями выполнения деятельности. Занимая лишь доли секунды, глазодвигательный акт подчиняется тем же самым законам, в соответствии с которыми строится любое произвольное движение. По существу, целенаправленное перемещение либо сохранение позиции глаз в орбитах выражает решение двигательной (окулоmotorной) задачи. Ее предметное содержание, с одной стороны, определяет состав и структуру сенсорных коррекций, моторные единицы, ведущий уровень организации и способ выполнения движений глаз, с другой – определяется характером взаимодействия индивида со средой, человека с миром. Познавательная потребность, схема ситуации, пространство зрительно воспринимаемых отношений, план действия, установка и состояние наблюдателя, перцептивные и интеллектуальные операции входят в окулоmotorный акт в качестве его психологического содержания. Соответственно в движениях глаз так или иначе проявляются закономерности организации психических процессов, степень их развития или деструкции (в случае патологии) и место, которое они занимают в структурах деятельности либо общения.

Итак, движения глаз несут полезную информацию о процессах ЦНС, способах регулирования движений, организации познавательных процессов, состояниях человека, его деятельности и общения. Чтобы получить ее, необходимо уметь регистрировать окулоmotorную активность.

Глава 3

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ

В настоящее время известен ряд способов измерения и оценки направленности взора человека, среди которых наиболее разработаны видеосъемка, электроокулография, фотооптический, фотоэлектрический и электромагнитный методы.

Видеосъемка

В исследованиях раннего периода (50–60-е годы ушедшего столетия) этот метод представлен в основном *кинорегистрацией* глаз. Она включала три взаимосвязанные процедуры: (1) киносъемку лица испытуемого в процессе решения познавательных и/или двигательных задач, (2) покадровый анализ пленки для определения направленности глаз и (3) наложение маршрута перемещений глаз на экспонируемый объект или тестовую ситуацию. Во время съемки объектив кинокамеры устанавливался: а) против лица испытуемого в плоскости экрана, на котором экспонировался объект, на расстоянии 50–80 см; б) напротив зеркала, в котором отражалось лицо испытуемого (рисунок 13). Скорость съемки выбиралась в зависимости от целей эксперимента: чем точнее необходимо было определить пространственно-временные характеристики окуломоторной активности, тем более высокая скорость (частота кадров в секунду) использовалась. Положение глаз испытуемого реконструировалось экспериментатором по окончании опытов в ходе покадровой обработки пленки на специализированном проекторе (рисунок 14). Источником информации об окуломоторной активности служили смещения изображения контролируемого элемента глаза (край или центр зрачка, кровеносный сосуд склеры, роговичный блик и т. п.) относительно неподвижной части лица или оборудования. Траектория (маршрут) движений глаз устанавливалась путем сопоставления относительного положе-



Рис. 13. Кинорегистрация движений глаз

Оператор ведет кино съемку отраженных в зеркале изображений глаз наблюдателя. Здесь и на следующих рисунках – кадры из фильма «Движения глаз в процессе зрения», Киевская киностудия научно-популярных фильмов, 1972 г. (из архива ИП РАН).



Рис. 14. Фрагмент процедуры покадровой обработки изображений исследователем

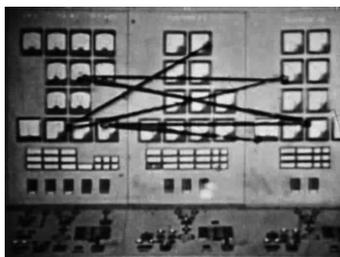


Рис. 15. Реконструированная траектория (маршрут) движений глаз на фоне изображения, рассматриваемого объектом

ния контролируемого элемента в смежных кадрах, а длительность движений – по соответствующему ему числу кадров (рисунок 15).

Метод ориентирован на измерение макродвижений глаз. Обеспечиваемая точность: $1-2^\circ$. Возможна моно- и бинокулярная регистрация. Киносъемка позволяла определять маршруты движений глаз относительно поверхности объекта, число и длительность фикса-

ций элементов стимульной ситуации больших угловых размеров (свыше $2-3^\circ$), направление и скорость прослеживающих движений глаз, смену фиксаций разноудаленных объектов.

В середине XX-го столетия киносъёмка представлялась единственным средством измерения окуломоторной активности у детей, отдельных категорий больных, а также у операторов сложных технических систем управления. Ее главное достоинство – прямая запись и связанные с этим безынерционность и достоверность регистрации. Это позволяло проводить исследования без предварительной калибровки, вычисляя позицию глаз на основе несложной формулы. Бесконтактный метод допускал возможность сохранения испытуемым естественной позы и небольших смещений головы. Вместе с тем он оказался чувствительным к условиям освещения поверхности лица испытуемого (что сужает круг решаемых задач) и отличался высокой трудоемкостью покадровой обработки отснятого материала.

Конкретные методики кинорегистрации движений глаз с указанием аппаратуры, стимульного материала, процедуры получения и обработки данных описаны в работах В. П. Зинченко (1956), Д. Н. Завалишиной (1965) и О. К. Тихомирова (1969).

Метод кинорегистрации позволил раскрыть наиболее общую связь взора человека с процессами познания и деятельности: функции движений глаз в процессах восприятия и мышления, соответствие маршрутов перемещений взора стратегии и тактике решения задач, дифференциацию на основе глазодвигательных критериев перцептивного и интеллектуального уровней деятельности, свертывание окуломоторной активности в ходе формирования перцептивных действий и др. Обнаруженные закономерности обосновывали практическую полезность метода. Вместе с тем становилось ясно, что он мало применим для изучения собственных механизмов окуломоторной активности, анализ которых выносился за рамки исследования. Развитием метода киносъёмки стала *телерегистрация* движений глаз. Профессиональная ТВ-камера и специализированное оборудование усиливали методический потенциал видеорегистрации, однако, в силу громоздкости и сверхвысокой стоимости экспериментальной установки ее широкое использование в исследовательском процессе оказалось малопривлекательным (рисунок 16).

Фотооптический метод

Данный метод базируется на принципе «оптических рычагов»: узкий пучок света, направленный на глазное яблоко, отражается от установленного на нем миниатюрного зеркала и поступает

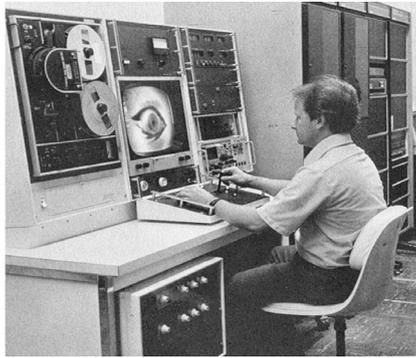


Рис. 16. Рабочее место оператора, ведущего съемку глаза испытуемого с помощью ТВ-оборудования (Lambert, 1976)

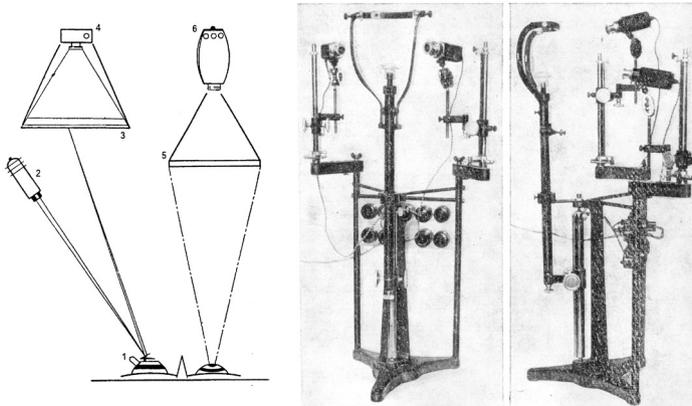


Рис. 17. Слева – схема установки для фотооптической записи движений глаз
1 – присоска с зеркалом; 2 – осветитель; 3 – экран регистрации;
4 – фотоаппарат; 5 – тестовый экран; 6 – проектор (Зинченко, Вергилес, 1969). Справа – фотография установки в двух планах (Ярбус, 1965).

на вход фоторегистрирующего устройства, например, шлейфового осциллографа или фотопластинку (рисунок 17). Перемещение глаза преобразуется в соответствующее перемещение светового луча, которое может быть развернуто как в пространстве, так и во времени.

Ключевым звеном данного метода является способ крепления зеркальца к главному яблоку. В распространенной методике А.Л. Ярбуса в качестве посредника использовалась легкая (несколько сот миллиграмм) вакуумная присоска, которая крепилась либо к височной части склеры (боковая присоска), либо к ее центральной

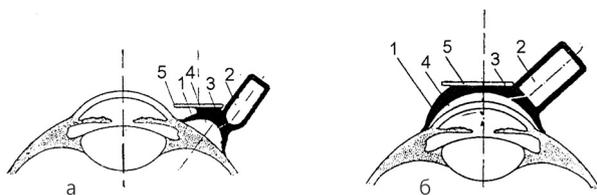


Рис. 18. Схематическое изображение боковой (а) и центральной (б) присосок (Ярбус, 1965)

1 – корпус присоски; 2 – баллончик для отсоса воздуха; 3 – зеркальце.

части, не касаясь роговицы (центральная присоска). Корпус присоски делался из резины, дюралюминия или пластмассы и имел внутри гофрированную поверхность, препятствующую скольжению по главному яблоку. Устойчивость присоски на глазу обеспечивалась путем создания (с помощью специального баллончика) пониженного давления в камере, образованной корпусом присоски и внешней поверхностью глаза (рисунок 18). Установка присосок требовала предварительного анестезирования глазного яблока; предельная продолжительность ношения присоски 20–30 мин. Как показывает многолетний опыт, присоски почти безвредны для глаз взрослого человека и в худшем случае вызывают разрыв капилляра наружной оболочки. Более щадящий, но менее точный режим регистрации движений глаз может быть достигнут с помощью контактных линз; их использование значительно увеличивает и длительность измерений (Ditchburn, 1973).

Фотооптический метод обладает наивысшей «разрешающей способностью» (до нескольких угловых секунд) и в принципе может быть использован при изучении всех известных видов окулоmotorной активности. Применение различных конструкций присосок и насадок к ним позволяет существенно расширить методические возможности исследования. Вместе с тем данный метод требует жесткой фиксации головы испытуемого, может использоваться лишь в отношении взрослых, предполагает высокие профессиональные навыки экспериментатора и некоторую долю мужества людей, соглашающихся на участие в опытах. К недостаткам метода можно отнести искажения записей при больших угловых размерах рассматриваемого объекта и/или искажения, вносимые ротационными движениями глаз. Определенные ограничения накладывает и необходимость проведения работы в затемненном помещении. Фотооптическая регистрация – сугубо лабораторный метод, рас-

считанный на использование очень ограниченного круга испытуемых (как правило, постоянных).

Методика фотооптической регистрации окуломоторной активности, ее модификации и особенности использования при изучении процессов зрительного восприятия, внимания, представления и действия изложена в работах А. Л. Ярбуса (1965), В. П. Зинченко и Н. Ю. Вергилеса (1969) и Ю. Б. Гиппенрейтер (1978).

В отличие от киносъемки, фотооптический метод позволяет раскрыть функциональную организацию окуломоторной активности и более тонкие опосредствованные связи движений глаз с процессами познания и деятельности (рисунок 19). Смысловой акцент исследований смещается в сторону миниатюрных форм окуломоторной активности, которые сопровождают зрительную фиксацию (динамика фиксационного оптокинетического нистагма – ФОКНа), восприятие изображений, стабилизированных относительно сетчатки (викарные перцептивные действия) или зрительно-двигательные координации (сопряженные движения глаз и руки). Соответственно меняются и регистрируемые характеристики движений, в число которых включаются амплитуда, направление, скорость дрейфа; амплитуда, скорость и ускорение микросаккад; амплитуда

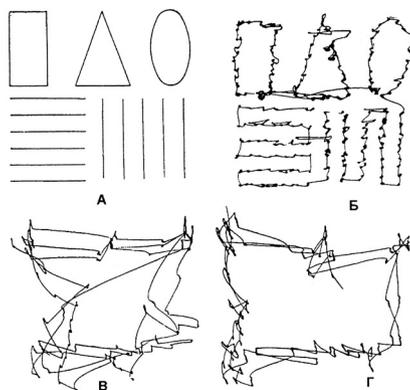


Рис. 19. Запись движений глаз при рассматривании геометрических фигур (Ярбус, 1965)

А – геометрические фигуры, которые предлагались испытуемому для рассматривания; Б – запись движений глаз, во время которой испытуемый старался плавно, без скачков, провести взор по линии геометрических фигур; В – запись движений глаза при свободном (без инструкции) рассматривании фигур в течение 20 с; Г – запись движений глаза при рассматривании фигур в течение 20 с после инструкции «рассмотрите фигуры и сосчитайте число прямых линий».

и частота физиологического нистагма и ФОКНа и некоторые другие; при этом возможность детального анализа макродвижений глаз сохраняется. Как показывают исследования, фотооптический метод применим и для решения ряда практических задач (клиника, операторская деятельность), но в очень ограниченном объеме.

Являясь эталонным в плане точности и диапазона выполняемых измерений, рассмотренный метод трудоемок и не приспособлен для оперативной обработки и представления получаемых в эксперименте данных. Его перспектива во многом зависит от применения устройств преобразования оптического выходного сигнала в электрический и использования на линии эксперимента современных ЭВМ.

Фотоэлектрический метод

Основу метода составляет возможность преобразования отраженного от роговицы пучка света (как правило, инфракрасного (IR) диапазона) в электрический сигнал. Чаще всего на фотоэлектрический датчик проецируется изображение переднего участка глаза, имеющего резкий перепад отражающей способности (например, край зрачка, лимб роговицы). При перемещении глаз меняется количество отраженного света и соответственно сила тока в цепи. Усилив сигнал, можно получить запись глазодвигательной активности на ленте самописца или иного регистратора данных.

Хотя конкретные способы описанного преобразования весьма разнообразны, большинство из них обеспечивают невысокую точность (около 1°), чувствительны к перепадам освещенности тестового объекта, ярким источникам света в помещении, слезоотделению и предполагают жесткую фиксацию головы. Главное достоинство метода – бесконтактность и возможность вести длительные измерения окулomotorной активности. Метод предназначен для лабораторных и клинических исследований.

Подробное описание аппаратуры, техники регистрации, процедуры и условий проведения исследований даны в работах А. Д. Владимирова (1972) и В. П. Смирнова (1984, 1985).

В методике А. Д. Владимирова изображение глаза при помощи оптической системы проецировалось на матовый экран, за которым помещались два горизонтально расположенные фоторезистора, чувствительные к инфракрасному свету. При фиксации точки, расположенной на уровне глаз прямо перед испытуемым, изображение устанавливалось симметрично относительно фоторезисторов; горизонтальные движения вызывали его перемещение, меняя

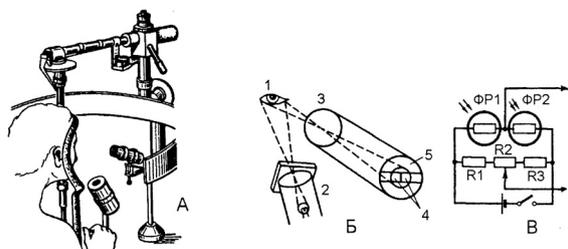


Рис. 20. Установка для фотоэлектрической регистрации движений глаз (Владимиров, 1972)

А – общий вид; Б – ход лучей в установке; 1 – глаз; 2 – осветитель с инфракрасным фильтром; 3 – объектив; 4 – фоторезисторы; 5 – матовое стекло с изображением радужки глаза; В – электрическая схема включения фоторезисторов (ФР1, ФР2).

освещенность фоторезисторов. Последние были включены в схему, выходное напряжение которой изменялось прямо пропорционально углу поворота глаз (рисунок 20). «Разрешающая способность» метода – $1-2^\circ$, диапазон линейности – $\pm 18^\circ$.

Для одновременной регистрации горизонтальной и вертикальной составляющих окуломоторной активности исследователь разработал методику, в которой в качестве индикатора движений использовался роговичный блик. Вследствие того, что центр вращения глаза и центр кривизны роговицы не совпадают, угол, под которым отражается неподвижный источник света на роговице во время движения глаза, изменяется. Смещение блика, таким образом, дает информацию о перемещении глаз. В сконструированной установке отраженный от роговицы блик проецировался в центр круглого матового экрана, разделенного на четыре сектора, за каждым из которых располагался фотоэлектронный умножитель. Перемещение изображения блика меняло распределение количества света, попадающего на катоды отдельных фотоэлектрических умножителей, и вызывало соответствующие изменения луча на экране электроннолучевой трубки. Платой за двухкоординатную запись движений глаз является сужение диапазона линейности измерений более чем вдвое ($\pm 5-7^\circ$). Типичные записи движений глаз при прослеживании контура фигуры и чтении приведены на рисунке 21.

Фотоэлектрический метод разрабатывался параллельно с другими методами регистрации движений глаз и наибольшее применение получил в сравнительных исследованиях окуломоторной активности у здоровых испытуемых и больных с локальными поражениями мозга.

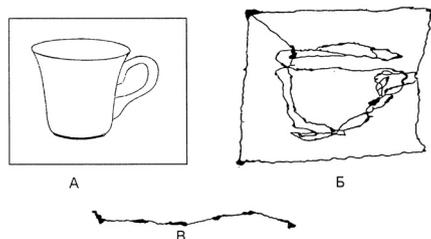


Рис. 21. Фотоэлектрическая запись движений глаз при рассматривании контура фигуры (Б) и чтении слова «путешествие» (В) (Владимиров, 1972)

Принцип регистрации роговичного блика как индикатора позиции и перемещения глаз был использован в установке В. П. Смирнова. В качестве преобразователя оптического сигнала в электрический применялась стандартная телевизионная передающая камера (фокусированное изображение роговичного блика передавалось приемнику по гибкому стекловолоконному жгуту). Учет закономерностей смещения роговичного блика в процессе поворота глаз позволил автору увеличить точность регистрации окуломоторной активности (до $40'$) и расширить диапазон ее линейности (до $\pm 26-30^\circ$), а применение ЭВМ на линии эксперимента – автоматизировать регистрацию и обработку данных о макродвижениях глаз и головы испытуемого. Предложенный метод позволил изучать деятельность операторов-наблюдателей оптических приборов и оценивать качество изображений, полезен при офтальмологических измерениях, а также при разработке биотехнических систем управления. Его недостатки – высокая себестоимость исследовательского комплекса, необходимость жесткой фиксации головы или регистрации ее перемещений, а также невозможность вести записи движений закрытых глаз.

Фотоэлектрический способ нашел применение в комбинированных системах регистрации и измерения окуломоторной активности типа НАС (Япония). Использование кино- или видеосъемки (миниатюрная камера устанавливалась на голове испытуемого) позволяло накладывать изображение позиции глаз на изображение воспринимаемого предмета или сцены. Эта процедура давала возможность вести исследования независимо от смещений наблюдателя и существенно облегчала анализ окуломоторной активности. Погрешность регистрации – $\pm 1,5^\circ$, рабочий угол – 30° . Закономерности организации деятельности оператора-технолога, выявленные данным методом, подробно рассмотрены в работе А. И. Галактио-

нова (1978). В качестве показателей эффективности деятельности он использовал маршруты движений глаз, частоту и длительность фиксаций оператором контролируемых приборов.

По существу, фотоэлектрический способ регистрации окуломоторной активности представляет своего рода гибрид, сочетающий свойства видеорегистрации и фотооптического метода. Он обеспечивает монокулярное измерение как статических (длительность, последовательность и частоту фиксаций), так и динамических (скорость, ускорения, частоту колебаний) параметров макродвижений глаз (чаще всего их горизонтальную составляющую). Метод полезен при анализе механизмов управления движениями глаз, зрительных эффектов, сопровождающих окуломоторную активность, и особенностей деятельности операторов-наблюдателей. Несмотря на большое разнообразие конкретных форм реализации, в исследованиях познавательных процессов и деятельности фотоэлектрическая регистрация движений глаз не получила широкого распространения.

Очевидно, что использование современной элементной базы (стекловолоконная оптика, миниатюрные видеокамеры и др.) и информационно-коммуникационных технологий способно не только существенно повысить точность и расширить диапазон выполняемых измерений движений глаз, но и сделать процедуру фотоэлектрической регистрации более простой, надежной и удобной.

Электроокулография

В основе этого метода лежит использование собственных электрических свойств глазного яблока. По своей физической природе оно является диполем, в котором роговица относительно сетчатки электроположительна. Электрическая ось глаза примерно совпадает с оптической осью и, следовательно, может служить индикатором направленности взора. Изменение разности потенциалов между роговицей и сетчаткой (корнео-ретиальный потенциал), сопровождающее перемещение глаз, обнаруживается через изменение потенциала в тканях, прилегающих к глазнице (рисунок 22).

Окуломоторная активность отслеживается с помощью электродов, которые устанавливаются крестообразно вокруг глазной впадины. Электроды, расположенные около височных углов глазной щели, регистрируют горизонтальную составляющую движений глаз, а электроды, расположенные около верхнего и нижнего края глазной впадины, – вертикальную составляющую движений глаз. Когда глаз находится в «позиции покоя», электроды расположены примерно одинаково как от положительного роговичного полюса,



Рис. 22. Установка электродов при записи электроокулограммы. Кадр из фильма «Движения глаз в процессе зрения», Киевская киностудия научно-популярных фильмов, 1972 г. (из архива ИП РАН)

так и от отрицательного. При повороте глаза один из электродов оказывается ближе к переднему положительному полюсу, а другой – к заднему; соответственно первый электрод становится электроположительным, а второй – электроотрицательным. Знак потенциала отражает направление, величина изменения разности потенциалов – угол поворота глаз; величина изменения корнео-ретинального потенциала и угол поворота глаз связаны прямопропорциональной (линейной) зависимостью, которая сохраняется в диапазоне ± 20 .

Электрический сигнал, возникающий в ходе поворота глаз, может быть усилен с помощью усилителей переменного или постоянного тока. Первые целесообразны при изучении скорости саккадических движений, вторые – при изучении паттернов глазодвигательных фиксаций, или маршрутов осмотра объекта. Усиленный и преобразованный сигнал может быть выведен на соответствующий регистратор данных и подвергнут дальнейшей обработке.

Точность электроокулографии во многом зависит от времени регистрации. Чем дольше длится измерение, тем больше смещения нуля, связанные с использованием усилителей постоянного тока и наличием внешних биоэлектрических или фотоэлектрических влияний. При записях отдельных скачков глаз точность регистрации колеблется в пределах $1-1,5^\circ$. Непрерывное время разового измерения – $5-7$ с; каждое последующее измерение предполагает корректировку дрейфа нуля. Как показывает практика, электроокулография эффективна при изучении маршрутов обзора объектов, имеющих большие угловые размеры ($15-20^\circ$); точность дифференцировок мелких деталей – $3-5^\circ$. Существенными факторами, влияющими на точность измерений, являются анатомия лица и индивидуальные особенности окуломоторного аппарата, время адаптации к условиям проведения эксперимента, плохой контакт электродов с поверхностью кожи, общее состояние человека (например, высокая возбудимость), повышенное потоотделение, частота моргания и другие. Необходимо отметить, однако, что совершенствова-

ние усилительной техники, разработка соответствующих способов выделения биоэлектрического сигнала из шума, применение аналоговых и дискретных преобразований биоэлектрических процессов на линии эксперимента позволяют преодолевать отрицательное влияние внешних факторов регистрации, повышать точность и надежность выполняемых измерений.

Несмотря на сравнительно невысокую точность, электроокулография обладает рядом существенных преимуществ: она не требует прикосновений к главному яблоку, допускает незначительные движения головы, проводится как на свету, так и в темноте, может осуществляться дистанционно. Главное состоит в том, что она не нарушает естественных условий зрительной активности и может продолжаться длительное время; этим определяется полезность использования электроокулографии как в лабораторном, так и в естественном эксперименте, например в кабине самолета или на рабочем месте оператора атомной электростанции. Типичная электроокулограмма фиксационных поворотов глаз приведена на рисунке 23.

Методики электроокулографического исследования, техники регистрации движений глаз и соответствующая аппаратура подробно описаны в работах А. А. Митькина (1970, 1974), А. Д. Владимировой (1972), А. И. Назарова и В. Г. Романюты (1972).

Достаточно эффективно электроокулография применялась при изучении раннего (начиная с двухнедельного возраста) онтогенеза зрительных функций человека (рисунок 24).

Возможность последующего преобразования биоэлектрического сигнала о движении глаз является одним из условий проведения управляемого эксперимента – такого, в котором его ход определяется не только заданной программой предъявления стимульного материала и регистрации ответов, но и состоянием испытуемого (в частности, состоянием его окуломоторного аппарата*) в текущий момент времени. Экспозиция визуального стимула в зависимости от положения глаз наблюдателя позволяет специфицировать закономерности зрительного восприятия до, во время и после выполнения саккады и сформулировать представления о природе эфферентных регуляций в зрительной системе.

Благодаря относительной простоте, удобству для испытуемого и невысокой стоимости оборудования электроокулография получила широкую сферу применения, которая включает ранний онтогенез перцептивных функций, нарушение гнозиса и моторики у больных с поражением центральной нервной системы и деятельность операторов автоматизированных систем управления (АСУ). Метод

* За рубежом эта тематика получила название gaze contingent paradigm.

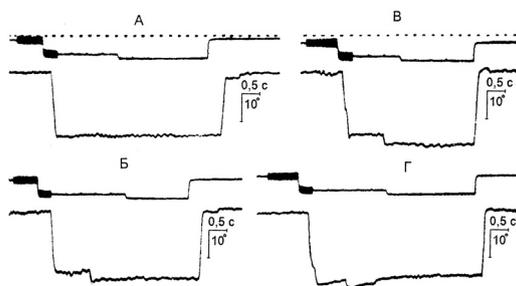


Рис. 23. Электроокулограмма целенаправленных фиксационных поворотов глаз в полной темноте (Гуревич, 1971)

А – поворот одним скачком; Б – двумя скачками; В – тремя скачками; Г – четырьмя скачками.

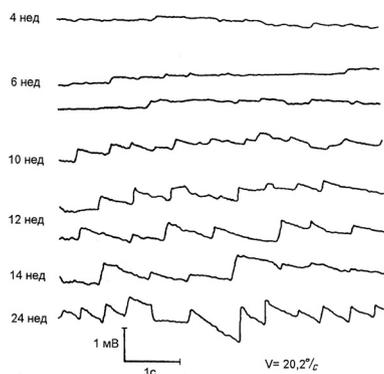


Рис. 24. Типичные глазодвигательные реакции младенцев различного возраста на оптокинетическую стимуляцию (Митькин, Козлова, Сергиенко, Ямщиков, 1978)

позволяет измерять основные параметры окуломоторной макроактивности, но плохо приспособлен для оценки точной координатной «привязки» глаза к позиции элементов зрительного поля и анализа торзионных движений. Регуляция саккадических и плавных протслеживающих движений глаз, взаимосвязь зрительного восприятия пространства и окуломоторной активности наблюдателя, структура зрительного поля, становление зрительных функций и действий, динамика обнаружения и идентификации объектов, вестибуло-окуломоторные отношения, эффекты саккадического и парасаккадического подавления, структура и динамика решения наглядно-действенных задач – главные предметные области, допускающие активное использование методов электроокулографии.

Электромагнитный метод

В основу метода положен принцип изменения напряженности электромагнитного поля при изменении расстояния между излучателем и приемником. Излучатель крепится на глазном яблоке (с помощью центральной присоски, контактной линзы или кольца), создавая переменное электромагнитное поле у приемных катушек, установленных неподвижно относительно головы. Сигнал, вызываемый перемещением излучателя, усиливается и передается на регистрирующее устройство (осциллограф, координатный самописец, ПК и др.). Таким образом, любая направленность/поворот глаз преобразуется в эквивалентное напряжение в приемных катушках, становясь доступным для тонкого измерения, магнитной фиксации и преобразований.

Возможен и обратный вариант: приемная катушка индуктивности крепится к глазу, а горизонтальные и вертикальные пары излучающих катушек создают вокруг глазного яблока переменное магнитное поле. Ось приемной катушки совпадает со зрительной осью глаза, а магнитное поле ориентировано так, чтобы в «позиции покоя» электродвижущая сила (ЭДС), наводимая от излучающих катушек, равнялась нулю. При изменении направления взгляда в приемной катушке наводится ЭДС, величина и фаза которых связаны с углом поворота глаз.

В методике Н. Ю. Вергилеса в качестве излучателя использовалась катушка диаметром 6 мм, состоящая из 5 витков тонкого провода; катушка крепилась на присоске на расстоянии 10 мм от глаза, соединяясь тонким проводом с генератором низкой частоты (8 кГц). Приемные катушки (две горизонтальные и две вертикальные) располагались на расстоянии 100 мм от излучателя перпендикулярно его плоскости. Для каждой пары катушек использовались два несимметричных резонансных усилителя, настроенные на частоту излучения (рисунки 25, 26). Линейность системы – около $\pm 25^\circ$, точность регистрации – $20\text{--}30^\circ$. Данные характеристики позволяли изучить не только макро-, но и микродвижения глаз (в ограниченном диапазоне).

Методика предполагала сравнительно простую калибровку, проводимую лишь в начале эксперимента, исключала необходимость перманентной корректировки дрейфа нуля, обеспечивала высокую точность дифференцировок мелких деталей воспринимаемого объекта. Напряжение, возникающее на выходе усилителей, могло быть использовано для подключения вспомогательных устройств и их управления определенными положениями глаз. Электромагнитная запись полезного сигнала и его последующее воспроизведение на пониженных скоростях создавали условия для детально-

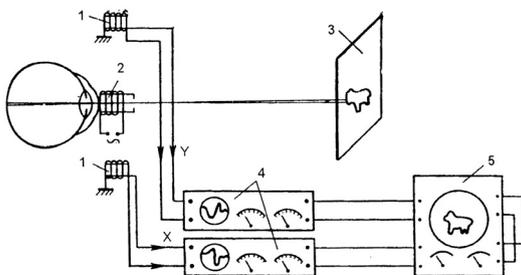


Рис. 25. Схема установки для электромагнитной регистрации движений глаз

1 – приемные катушки – антенны; 2 – индукционный излучатель-датчик; 3 – экран с тестовым изображением; 4 – усилители сигналов; 5 – регистрирующий осциллограф (Андреева, Вергилес, Ломов, 1975).



Рис. 26. Н. Ю. Вергилес с установленной на глаз присоской. Кадр из фильма «Движения глаз в процессе зрения», Киевская киностудия научно-популярных фильмов, 1972 г. (из архива ИП РАН)

го и глубокого анализа быстротекущих окуломоторных процессов. Достоинством метода стала возможность быстрого переключения масштабов записи, а также независимая регистрация движений правого и левого глаза в отдельности.

Недостатки метода связаны, прежде всего, с использованием присосок и необходимостью жесткой фиксации головы испытуемого. Это существенно ограничивало время регистрации движений глаз (до 25–30 мин) и использование данной процедуры в ходе профессиональной деятельности. Определенные ограничения накладывались и на контингент испытуемых: в экспериментах не могли участвовать дети или пожилые люди, страдающие глаукомой. Некоторое расширение функциональных возможностей метода могло быть достигнуто путем укрепления катушки излучателя не на присоску, а на контактную линзу. Однако в этом случае экспериментатор сталкивался с проблемой индивидуальной подгонки контактной линзы под характеристики склеры каждого ис-

пытуемого. Основное назначение электромагнитного метода – лабораторный эксперимент.

Развитие электромагнитного метода связывалось с решением ряда задач: а) с разработкой более эффективных преобразователей движений глаз, основывающихся на индуктивном или взаимноиндуктивном принципе; б) с разработкой способов одновременной регистрации микро- и макродвижений; в) с поиском новых путей крепления регистрирующих устройств к главному яблоку. Соответствующая модификация электромагнитного метода была предложена В. Лауритисом. В отличие от методики Н. Ю. Вергилеса к главному яблоку прикреплялась не катушка индуктивности с выходящими из нее проводками, а один короткозамкнутый виток в виде ферромагнитного или легкого дюралюминиевого кольца. Чувствительная часть преобразователя состояла из нескольких катушек, установленных на оправе специальных очков. При изменении положения глаза с кольцом относительно приемных катушек в последних наводилась ЭДС, которая и регистрировалась. Преобразователь не ограничивал движения головы, хотя при необходимости ее фиксации может быть использован зубной слепок. Естественные размеры поля зрения (в отличие от присосочных методик) оставались практически неизменными. Линейность измерений: по горизонтали – $\pm 15^\circ$, по вертикали – $+10^\circ$. Точность, или абсолютная погрешность измерителя – не более $\pm 15'$.

Описанная методика имела два существенных преимущества. Во-первых, благодаря специальному преобразованию сигналов, она позволяла с высокой точностью регистрировать одновременно и макро-, и микродвижения. Во-вторых, использование кольца, или кольцевой присоски существенно (в несколько раз) увеличивало время непрерывной регистрации окуломоторной активности, что делало методику релевантной ситуации решения разнообразных практических задач.

Аппаратура, процедура и условия проведения исследований с использованием электромагнитной регистрации движений глаз описаны в работах: Зинченко, Вергилес, 1969; Андреева, Вергилес, Ломов, 1975; Барабанщиков, Белопольский, Вергилес, 1978; Лауритис, Крищунас, Луук, Хуйк, Аллик, 1977; Крищунас, Лауритис, 1977.

Уникальность экспериментов Н. Ю. Вергилеса во многом определяется остроумным использованием возможностей глазной присоски. Последняя может выполнять роль каркаса, несущего разнообразные миниатюрные устройства, например, тахистоскоп или диапроектор. Поскольку эти устройства перемещаются вместе с глазом, создаются благоприятные условия для изучения зри-

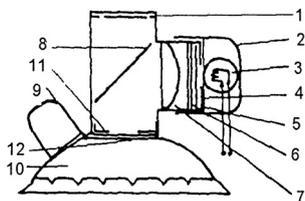


Рис. 27. Конструкция центральной глазной присоски (Вергилес, 1972)

1 – вертикальный тубус; 2 – горизонтальный тубус; 3 – лампа накаливания; 4 – диафрагма, определяющая размеры адаптирующего поля; 5 – матовый экран; 6 – кассета нейтральных и цветowych фильтров; 7 – корректирующая линза; 8 – полупрозрачное стекло; 9 – резиновый баллончик для откачки воздуха; 10 – корпус присоски; 11 – внутренняя диафрагма; 12 – стеклянное окошко.

тельного восприятия объектов при стабилизации их изображения на поверхности сетчатки (рисунок 27). Как показали исследования, в этой необычной ситуации наблюдатели способны решать широкий круг зрительных задач (рассматривание изображения, опознание, поиск, пересчет элементов и др.), хотя движения глаз значительно отличаются от нормальных (ускоренным дрейфом глаз и уменьшенной амплитудой саккад).

Использование электромагнитной регистрации движений глаз позволило разработать новый метод исследования: оптическую трансформацию зрительной обратной связи ГДС. Устанавливая на глазное яблоко (посредством центральной присоски) различные оптические системы, экспериментатор изменял свойства канала зрительной обратной связи и, как следствие, характер окуломоторной активности (рисунки 28, 29). Это открыло новые возможности изучения механизмов регуляции движений глаз и их роли в процессе зрительного восприятия.

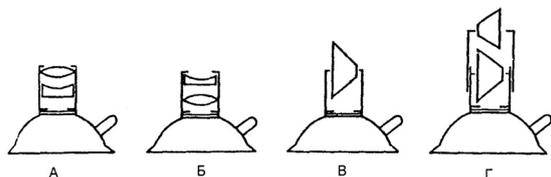


Рис. 28. Схематическое изображение центральных присосок с оптическими системами, обеспечивающими различные виды преобразований ретинального образа и, соответственно, зрительной обратной связи

А – увеличение; Б – уменьшение; В – инверсия; Г – изменение ориентации (Барабанщиков, Белопольский, 1984).

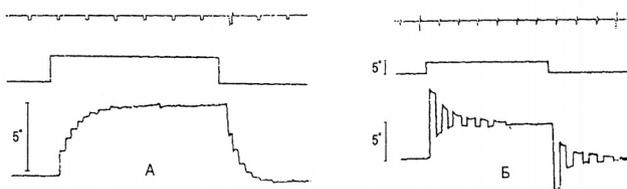


Рис. 29. Окулограммы движений глаз (горизонтальная составляющая) в процессе смены точек фиксации

Коэффициент зрительной обратной связи: $-0,3$ (А) и $+2,4$ (Б) (Барбанщиков, Белопольский, Вергилес, 1980).

Электромагнитный метод предоставляет широкий круг возможностей изучения механизмов окуломоторной активности, ее связей с процессом зрительного восприятия, состоянием и деятельностью человека. Он позволяет измерять параметры макро- и микродвижений глаз в условиях моно- и бинокулярного восприятия как на свету, так и в темноте (при закрытых веках), демонстрирует высокую «разрешающую способность», большой диапазон линейности, возможность быстро переходить от одного масштаба измерений к другому, допускает использование специализированных устройств трансформации зрительного «входа» и, соответственно, исследование преобразованных форм окуломоторной активности. Именно с последним связаны главные достижения исследований, в которых применялась электромагнитная регистрация. Искусственное изменение оптических свойств глаза ведет к развертыванию автоматизированных процессов решения зрительных задач, которые в обычных условиях протекают в очень короткие интервалы времени и плохо поддаются психологическому анализу. Последовательное сокращение объема движений и исчезновение неспецифических форм окуломоторной активности в ходе повторного решения зрительных задач являются индикатором адаптации ГДС и зрительного процесса в целом.

Ограничения рассмотренной разновидности электромагнитного метода (короткое время эксперимента, жесткая фиксация головы наблюдателя, невозможность измерения движений закрытых глаз и некоторые другие) сравнительно легко преодолеваются в тех модификациях, которые предполагают использование контактного кольца.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ОКУЛОМОТОРНОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Окуломоторная активность является необходимым компонентом психических процессов, связанных с получением, преобразованием и использованием зрительной информации, а также состояний, деятельности и общения человека. Поэтому, регистрируя и анализируя движения глаз, исследователь получает доступ к скрытым (внутренним) формам активности, которые обычно протекают в свернутой форме, исключительно быстро и неосознанно. Как показывают исследования, по характеру движений глаз можно определить:

- направленность взора и динамику оперативного поля зрения воспринимающего;
- стратегии прослеживания движущихся объектов и маршруты сканирования воспринимаемых сцен;
- информационную сложность объекта и точность фиксации его элементов;
- зоны поиска и «проигрывания» вариантов решения наглядно-действенных задач;
- структурные единицы деятельности и уровень сформированности познавательных действий;
- состояния сознания;
- уровень развития зрительных функций на разных стадиях онтогенеза;
- эффективность решения оперативных задач и/или исполнения отдельных этапов практической деятельности;
- деструкции познавательных процессов человека и др.

В отличие от самоотчета или внешнего наблюдения за движениями глаз окулография дает не только непрерывную, достоверную, детализированную, но и качественно иную информацию об изучаемых явлениях. Это один из наиболее чувствительных индикато-

ров динамики познавательного процесса и форм взаимодействия человека с окружающим миром.

Фундаментальная проблема

Несмотря на кажущуюся простоту и однозначность, связь познавательных процессов, состояний человека и разнообразных форм его поведения с окуломоторной активностью является исключительно сложной, многократно опосредствованной и изменчивой. Ее содержание составляет самостоятельную проблему исследования, которая может быть сформулирована в виде трех вопросов:

- Каковы механизмы регуляции (построения) движений глаз в процессах познания, деятельности и общения человека?
- Какую роль играет окуломоторная активность в этих процессах?
- Индикатором каких проявлений познания, деятельности и общения людей служат характеристики движений глаз?

Данная проблема выступает как комплексная, объединяющая представителей разных специальностей (психологов, физиологов, инженеров, программистов, оптиков, медиков и искусствоведов), а ее разработка поддерживается не только собственными потребностями науки, но и запросами практики: эргономики, офтальмологии, психиатрии, радиологии, инженерной психологии, маркетинга, рекламы и др. По своему научно-практическому потенциалу это «точка роста» нового знания и исследовательских технологий.

Современное состояние проблемы характеризуется многообразием изучаемых явлений (их сторон, планов, измерений) и неравномерностью их проработки. Большое внимание уделяется анализу движений глаз в процессах поиска, обнаружения, опознания и прослеживания значимого элемента среды, рассматривания сюжетных изображений, выполнения сложных зрительных и интеллектуальных задач. Наиболее частым предметом исследования оказываются макросаккады и дрейф либо прослеживающие движения – они исследованы достаточно полно; хуже изучены тремор, вергентные и торзионные движения. В качестве контролируемых параметров обычно выступают относительная позиция глаза в орбите, последовательность (маршруты) и продолжительность зрительных фиксаций; амплитуда, частота и латентный период саккад; векторная скорость и амплитуда дрейфа и плавных прослеживаний; частота, амплитуда и направление различных форм нистагма (физиологического, оптокинетического, инверсионного и др.), причем в каж-

дом отдельном исследовании оценивается не более двух–трех параметров. Многомерное, или «объемное», описание окуломоторной активности, включающее все или большинство видов движений глаз, остается недостижимой мечтой. Наконец, фрагментарен контингент испытуемых, который составляют нормальные взрослые (от 18 до 50 лет), дети (от двухнедельного возраста), а также больные с нарушением окуломоторной активности различного анамнеза.

Функциональная организация окуломоторной активности несет отпечаток многообразия связей и отношений движений глаз и, в зависимости от контекста исследования, становится индикатором разных аспектов познавательных процессов, деятельности либо общения. В плане субъект-объектного взаимодействия – это, например, стратегия и тактика решения наглядно-действенных задач, выработка или восстановление перцептивного навыка; в плане внутренних условий – структура взаимодействия мотивационного, диспозиционного, когнитивного и исполнительного компонентов познавательного процесса; в плане зрительного образа – динамика стадий и фаз его развертывания. Соответственно, эффективность метода регистрации движений глаз как индикатора психических процессов (состояний, деятельности) зависит от того, насколько полно в конкретном исследовании учитывается вся совокупность их связей и опосредствований.

Практические приложения

Область прикладных исследований движений глаз постепенно расширяется (за счет включения новых сторон практики), методы регистрации становятся все более точными и удобными как для экспериментатора, так и для испытуемого, а связь прикладных исследований с фундаментальными через взаимный обмен методическими приемами, данными, концептуальными представлениями становится все более тесной. Практически ориентированные исследования концентрируются вокруг нескольких тем.

- Анализ и организация конкретных видов операторского труда, связанного с управлением сложными технологическими объектами (АСУ, транспортные средства и т. п.); методы окулографии позволяют осуществить контроль за обучением специалистов, дать критерии оценки систем отображения информации и эффективности операторской деятельности.
- Диагностика психических заболеваний, мозговых поражений, состояния зрительных функций и окуломоторного аппарата; методы окулографии дают возможность установить «окуломотор-

ные» симптомы нарушений познавательных процессов и деятельности.

- Коррекция развития и формирования познавательных действий; методы окулографии обеспечивают мониторинг стратегий решения зрительных, мнемических и интеллектуальных задач.

Универсального метода, пригодного для решения любых задач, относящихся к проблеме движений глаз, не существует. Каждый конкретный метод имеет как достоинства, так и ограничения, касающиеся точности и диапазона линейности измерений, трудоемкости регистрации и анализа данных, удобства для испытуемого и влияния на выполняемую им деятельность, сочетаемости с другими инструментами и процедурами исследования, надежности получаемых данных и др., и обеспечивает решение вполне определенного класса исследовательских и/или практических задач. За каждым из них стоят конкретные предметные представления и конstellляции проблем, которые становятся источником специальных методов исследования окуломоторной активности, зрительного восприятия и поведения (таких как, например, трансформация зрительной обратной связи или фиксационный оптокинетический нистагм).

Требования к организации исследований

Главное требование, предъявляемое сегодня к исследованию окуломоторной активности человека, состоит в использовании высокоавтоматизированных (на основе компьютера) комплексов регистрации глазодвигательной активности и анализа данных. Это позволяет не просто повысить точность и увеличить диапазон линейности измерений направленности/движений глаз, учесть индивидуальные характеристики глазного яблока, упростить процедуры калибровки и обработки данных, но и изменить методический строй исследований, при котором основной акцент с техники (средств) регистрации смещается на ее программное обеспечение. Активное использование компьютера меняет место процедуры регистрации движений глаз в структуре экспериментального исследования. Являясь в прошлом прерогативой узких специалистов, она стала входить «в обиход» стандартных методов и использоваться широким кругом исследователей и практиков. Это, в свою очередь, создает предпосылки иной стратегии научного познания, учитывающей разнопорядковые взаимосвязи окуломоторной активности и ориентированной не только на хорошо выраженные, «первичные» особенности системы регуляции движений глаз, но и на неочевид-

ные, «вторичные» свойства, выявление которых требует больших массивов данных.

Безусловно, развертыванию более широкого фронта работ в данной области способствует и промышленное производство айтрекеров, но, к сожалению, не в России (в советский период большинство установок было сконструировано руками самих экспериментаторов и существовало в одном – двух экземплярах).

Необходимо иметь в виду, однако, что использование новых аппаратов и технологий исследования само по себе не ведет к раскрытию новых свойств и закономерностей движений глаз. Требуется совершенствование концептуальной базы исследований, появление более глубоких представлений об организации окуломоторной активности и включающих ее психических явлений. Поскольку общая тенденция развития проблемы предполагает все более полную спецификацию связей и опосредствований моторики и соответствующих параметров перцепции, перспектива использования методов окулографии в психологии лежит на пути модификации самого методического принципа: создание средств, учитывающих многозначность отношений направленности/перемещений глаз с другими проявлениями состояний, познавательных процессов, деятельности и общения человека.

ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ОКУЛОМОТОРНОЙ АКТИВНОСТИ

Длительное время окуломоторная активность изучалась поэлементно, на уровне отдельно взятых движений (саккад, плавных протракиваний и т. п.). Каждое движение рассматривалось как ответ на простейший стимул (локализацию точечного элемента в зрительном поле, его перемещение относительно наблюдателя и т. п.), связывалось с наличием самостоятельного исполнительного механизма и непосредственно соотносилось с процессами познания, прежде всего зрительного восприятия, внимания и деятельности. Предполагалось, что знание закономерностей элементарных движений глаз достаточно для интерпретации сложных или составных форм окуломоторной активности.

На первых порах подобные представления оправдывались, стимулируя быстрое накопление эмпирических знаний. За сравнительно короткий период были описаны простейшие виды окуломоторной активности и их детерминанты, высказаны гипотезы о механизмах регуляции элементарных движений глаз, исследовано развитие окуломоторики в фило- и онтогенезе, получены важные сведения о характере движений глаз в процессах поиска, обнаружения, опознания и оценки объектов; выявлен ряд окуломоторных феноменов зрительного восприятия, прослежены связи элементарных движений глаз с перемещениями головы, рук, локомоциями и др.

Со временем темпы разработки проблемы замедлились, обнажив ограниченность используемых представлений там, где основным предметом исследования оказывается конкретный познавательный процесс, деятельность либо общение человека. Принимаемые допущения выглядят здесь излишне упрощенными и порой неадекватными. Так, нередко малоамплитудный дрейф отождествляется с устойчивой фиксацией, обеспечивающей съём полезной зрительной информации, а саккада – с поворотом глаз, меняющим предмет

восприятия. «Спроецировав» окулограмму на поверхность воспринимаемого объекта (например, приборную панель или текстовый материал), казалось бы, без труда можно определить, что выделяет наблюдатель (что его интересует), в течение какого времени и в какой последовательности. Однако результат подобного анализа далеко не всегда соответствует действительности.

Фиксационный поворот глаз может состоять не из одной, а из нескольких макросаккад, число которых зависит от локализации предмета восприятия. Возможно появление экспресс-саккады, которая не связана с глубокими (предметно-смысловыми) слоями переработки зрительной информации. Наряду с обслуживанием когнитивных функций, саккады способны корректировать направление глаз, достигнутое в результате предшествующей фиксации, возвращать его в позицию покоя, «дробить» непрерывный поток зрительных афферентаций на отдельные порции и т. п. Наконец, как макро-, так и микродвижения глаз поддаются произвольному контролю и могут не только инициироваться, но и подавляться наблюдателем. Не меньше вопросов порождает и малоамплитудный дрейфа, который сам по себе не указывает на действительный предмет восприятия. В силу многоканальности зрительного «входа», обеспечивающего симультанное отображение элементов среды разных угловых размеров в различных частях зрительного поля, направленность взора чаще всего оказывается *многозначной*, а ее отношение к потенциальным предметам восприятия требует дополнительных подтверждений.

Окуломоторные структуры

Альтернативный путь разработки проблемы связан с изучением целостных окуломоторных образований (структур), выражающих более высокий уровень организации движений глаз. Влияние этого уровня обнаруживается, например, в программировании паттернов сканирования, которые не сводятся к сумме отдельных дрейфов и саккад; каждое из выполняемых движений может быть понято лишь в рамках всего паттерна в целом. Не случайно, несмотря на большой разброс отдельных значений, суммарная длительность фиксаций, сопровождающих чтение слов, остается примерно одинаковой. В отличие от элементарных движений окуломоторные структуры, как правило, включены в процесс зрительного восприятия и имеют собственные закономерности организации.

В рамках данного подхода окуломоторный акт выражает не просто ответ на проксимальный стимул. Это активность субъ-

екта восприятия, которая направляется как прошлым и настоящим, так и будущим: определенными намерениями, целями, планами или программами. За направленностью взгляда скрывается уникальная позиция наблюдателя, благодаря которой целенаправленный поворот оказывается столь же пристрастным, сколь пристрастно самое чувственное восприятие действительности. Через отношение к субъекту глазодвигательная активность становится предметом *психологического* исследования, а ее регистрация – методом изучения психических процессов, состояний, деятельности и общения людей. Отмечаемые в литературе функции движений глаз, такие как гностическая, исполнительная, измерительная, контролирующая и др., являются характеристиками субъекта восприятия (содержанием того, что он делает в данный отрезок времени), перенесенными на средства его взаимодействия с объектом; с точки зрения механизма выполнения окуломоторного акта они, конечно, искусственны.

Методический смысл отнесенности движений глаз к субъекту восприятия состоит в возможности расчленять поток окуломоторной активности на целостные, относительно самостоятельные единицы и внутренне сопоставлять их с динамикой познавательных процессов, состояний человека, форм его деятельности и общения. Через отнесенность к субъекту раскрывается механизм произвольного контроля движений глаз и управления взором наблюдателя, а также индивидуально-психологическая стилистика познавательных процессов.

Окуломоторное целое (структура) обеспечивается интеграцией (прилаженностью друг к другу) эфферентных и афферентных процессов, развертывающихся в центральной нервной системе. Хотя двигательная цель или намерение реализуются в виде последовательности окуломоторных команд, решающая роль в построении окуломоторного акта принадлежит обратной афферентации (зрительной, проприоцептивной, вестибулярной), которая информирует заинтересованные инстанции ЦНС об эффективности выполняемых движений. За тем или иным окуломоторным феноменом всегда стоят особенности управления, или способ функционирования глазодвигательной системы в целом.

Информационное содержание афферентаций, задействованных в осуществлении окуломоторных структур, весьма разнообразно. Оно включает совокупность пространственно-временных характеристик среды, текущее положение глаз в глазнице, наклоны головы, положение или перемещение наблюдателя и многое другое. Нетрудно допустить, что афферентные потоки, организующие

окуломоторную активность и питающие зрительные впечатления, в значительной степени совпадают или, по крайней мере, тесно взаимосвязаны. Есть, например, основания полагать, что информация о пространственно-временных отношениях среды, заключенная в двигательных командах, входит в содержание зрительного образа. Влияние на зрительный процесс проприоцепции экстраокулярных мышц не раз демонстрировалось экспериментально, но до сих пор и вопросы о роли движений глаз в зрительном восприятии (познавательных процессах вообще) и о перцептивной (когнитивной) регуляции самих движений остаются открытыми. В конечном счете, они упираются в знание принципов зрительно-окуломоторной интеграции, которые пока сформулированы в самом общем виде.

Наконец, целенаправленная окуломоторная активность открывается исследователю как конфигурация (паттерн), образованная на основе элементарных генетически данных движений – саккад и дрейфов. Типичными примерами могут служить оптокинетический нистагм, п-образные движения во время фиксации точечного источника света, синусоидальные колебания глаз у пациентов с локальными нарушениями центральной нервной системы, регулярные паттерны движений глаз, сопровождающие процессы чтения и рассматривания сложных изображений. Несмотря на широкую вариативность двигательных элементов (изменения амплитуды, направления, латентного периода саккад, скорости, ускорения, амплитуды и направления дрейфа или прослеживающих движений), характер их отношений остается неизменным, а окуломоторное целое несводимо к сумме своих частей.

Способы включения глазодвигательной активности в процесс взаимодействия наблюдателя (субъекта восприятия) со средой (объектом), механизмы зрительно-окуломоторной интеграции, которая складывается для выполнения конкретной зрительной или двигательной задачи, и соответствующая ей устойчивая конфигурация (паттерн) собственно движений глаз характеризуют разные уровни организации и функционирования окуломоторных структур, без анализа которых окулография сама по себе оказывается малоэффективной. Типичным примером и репрезентативной моделью окуломоторных структур восприятия выступает целенаправленный фиксационный поворот глаз.

В рамках психологического анализа движения глаз включены в систему взаимосвязей человека с миром, что является основанием многомерности и иерархической организации окуломоторной активности. Одна и та же направленность взора может указывать одновременно на 1) содержание (предмет) восприятия; 2) способ

выполнения решаемой задачи; 3) область интереса наблюдателя; 4) его состояние; 5) характер выполняемых действий; 6) индивидуально-психологические особенности глазодвигательной системы и др. Для того чтобы разобраться в клубке взаимосвязей, необходимо выделить интересующее измерение либо путем конструирования подходящей ситуации, либо введением дополнительных методических средств, снижающих исходную многозначность.

Обращение к окуломоторным структурам предполагает целостный взгляд на природу перцептивного процесса (Барабанчиков, 2002, 2006). В центре внимания оказывается не отдельное явление (сторона, аспект, момент) восприятия и не восприятия вообще (абстрактно-всеобщая форма), а конкретное событие жизни человека, реализующее его познавательное отношение к среде. Взаимосвязь субъекта и объекта восприятия выражает единство разных сторон одного и того же целого, имеет собственный онтологический статус, внутренне дифференцирована, развернута в пространстве и времени, включено в цепь других событий. Раскрывая закономерности окуломоторных структур, исследователь получает возможность реконструировать способ организации перцептивного процесса в целом.

На сегодняшний день окуломоторные структуры изучены не столь детально, как элементарные, генетически заданные движения глаз. Очевидно, что, минуя уровень интеграции, знания о направленности взора будут оставаться существенно неполными, а в практическом отношении – очень ограниченными.

Детерминанты движений глаз

С точки зрения системной парадигмы, обращение к идиомам, указывающим на связь движений глаз с процессом зрительного внимания: «Где» (Г. Гельмгольц) и «Что» (У. Джемс) – явно недостаточно. В силу анизотропности сетчатки фиксационные повороты действительно инициируются парафовеально – отдельными областями зрительного поля, имеющими сравнительно низкую различительную чувствительность, а их фовеализация (фиксация предмета) позволяет собирать ясную и отчетливую информацию об интересующем объекте или событии. Но существуют и другие причины, влияющие на окуломоторную активность и определяющие ее характер, в том числе и самую возможность выполнения целенаправленных поворотов глаз и распределения фиксаций.

Важнейшим фактором, обуславливающим характеристики движений глаз, является задача, решаемая наблюдателем. Любая среда,

в которой оказывается человек, информационно избыточна. Где, что и как будет воспринято, определяет цель, данная в определенных условиях. Задача, стоящая перед наблюдателем, структурирует наличную ситуацию, вносит значимость (информативность) элементов среды, определяет существенные и несущественные отношения. Направленность/движения взгляда обеспечивают адекватные условия восприятия. Зная, куда направлен взгляд, как долго, какова траектория (маршрут) движения и т. п., можно реконструировать психологическую структуру ситуации и динамику решения зрительной задачи. Данное обстоятельство, собственно, и является основанием использования окулографии в качестве метода психологического исследования. За каждой устойчивой фиксацией просматриваются меняющиеся установки и отношения субъекта восприятия, его интерес к объекту, величина и длительность когнитивной нагрузки и другие психологические характеристики.

Очевидно, что с изменением цели и условий деятельности человека рисунок окуломоторной активности меняется. При этом меняется не только локализация и содержание значимых элементов (*где и что* воспринимается), но и требования к их восприятию (*как* воспринимать, насколько точно или дифференцированно). С последним связано понятие *функционального поля зрения*, величина которого в ходе перцептивного процесса перманентно меняется. В силу многоканальности зрительной системы одной и той же направленности взгляда может соответствовать и элемент среды, на который он непосредственно ориентирован, и конstellация элементов, входящих в его окружение. В рамках функционального поля зрения и то, и другое воспринимается одинаково эффективно. Оценка предмета восприятия на основе местоположения точки фиксации оказывается неоднозначной и требует использования дополнительных критериев.

Вектор направленности взгляда может входить, а может не входить в границы функционального поля зрения либо находиться на его периферии. В любом случае образуется относительно самостоятельная область направленности глаз, обеспечивающая необходимое восприятие значимых элементов среды, – *оперативная зона фиксаций*, которая в зависимости от требований задачи легко меняет свою локализацию, форму и величину. Оперативная зона фиксаций комплексных объектов имеет неоднородное строение и включает 1) ядро, или «центр тяжести» – наиболее часто фиксируемые области предмета; 2) область менее интенсивных фоновых фиксаций, ограниченную поверхностью объекта; и 3) область разреженных фиксаций вне поверхности объекта (периферию). Располо-

жение «центра тяжести» часто не совпадает ни с геометрическим центром поверхности объекта, ни с геометрическими центрами его компонентов. Возможно наличие нескольких «центров тяжести» одновременно. Фиксационный «центр тяжести» характеризуется следующими параметрами: локализацией, фронтом (формой) и интенсивностью. Его профиль, наряду с содержанием зрительной задачи, зависит от конфигурации поверхности объекта, его локализации в поле зрения и социокультурных навыков наблюдателя.

Таким образом, проблема соотношения направленности взора и расположения (зрительного направления) предмета восприятия трансформируется в проблему соотношения функционального поля зрения и оперативной зоны фиксации, закономерности которого требуют более внимательного исследования. На сегодняшний день описаны два крайних способа восприятия объекта: симультанный («амбъентный», «глобальный») и сукцессивный («фокальный», «локальный»). Первый обеспечивает общую ориентировку в объекте, когда взор направлен в область его геометрического центра, второй – получение более детальной информации о фрагментах (элементах) объекта, когда направленность взора локализуется в пределах сравнительно узкого участка поля зрения. Нетрудно предположить существование промежуточных, или переходных, способов восприятия, которые расширяют и конкретизируют картину перцептивно-окуломоторных отношений. Добавим, что выполнение человеком не зрительной, а интеллектуальной задачи (решение «в уме») сопровождается длительным дрейфом глаз, не связанным с содержанием и структурой окружающей среды.

При повторных решениях однотипных зрительных задач характер окуломоторной активности также меняется. С укрупнением оперативных единиц восприятия стратегия и тактика решения оптимизируются, а объем движений глаз сводится к минимуму. Благодаря этим тенденциям окулография является эффективным методом изучения и/или контроля за формированием зрительных (когнитивных) действий.

В число важных детерминант окуломоторной активности входят пространственно-временные свойства окружающей среды, локализация предмета в поле зрения, стадия или этап осуществления перцептивного процесса, социокультурный опыт наблюдателя и др.

Текущая позиция взора в значительной степени определяется конфигурацией объекта восприятия и его расположением в поле зрения. Целевые и фоновые стимулы визуально объединяются в фигуры, имеющие собственный «центр тяжести». Воздействие стимулов на параметры саккад асимметрично: чаще всего амплитуда пер-

вой саккады меньше расстояния до цели, а фиксационный поворот как целое включает несколько саккад, прерывающихся короткими фиксациями; с увеличением расстояния до цели количество дополнительных саккад возрастает. Субъективно систематическое отклонение взора от предмета восприятия, как и наличие сложных по структуре поворотов глаз, наблюдателями не замечаются. Расположение предмета восприятия в зрительном поле, его значимость для наблюдателя, а также конфигурационный контекст оказывают влияние и на продолжительность латентного периода саккад.

При восприятии контурных фигур точки фиксации располагаются внутри ее границ и могут как совпадать, так и не совпадать с геометрическим центром. Точность выполнения саккады зависит от того, на какой стадии зрительного микропроцесса принимается решение о движении. Локальному выделению целевого стимула предшествует глобальное восприятие объекта и его ближайшего окружения. Чем продолжительнее латентный период саккады (и соответственно, длительность предшествующей фиксации), тем выше ее точность. Распределение фиксаций зависит от конфигурации объекта, его симметричности, размера, полноты и завершенности. Скопление фиксаций, или «зона интереса», соответствует тем областям среды, где существует наибольшая вероятность получения прогностической информации. Вместе с тем при экспозиции комплексного объекта фиксации могут как «притягиваться» к позиции целевого стимула (якорный эффект), так и «выталкиваться» им в свободное пространство, окружающее стимул (эффект вытеснения). В общем случае зрительный и фиксационный «центры тяжести» одной и той же фигуры не совпадают.

К числу детерминант, обуславливающих динамику направленности взора, относятся социокультурные навыки человека, включая навыки чтения, письма и рисования, а также выработанные в онтогенезе индивидуальные стили восприятия и действия. В частности, фиксационные повороты глаз и распределения зрительных фиксаций русскоязычных и арабоязычных наблюдателей в одних и тех же частях поля зрения, как правило, различны, а в некоторых случаях – диаметрально противоположны.

Совокупность всех возможных направлений взора при неизменном положении головы образует *окуломоторное поле* человека. Его структура включает: 1) центральную область (от нескольких угловых минут до $1,5^\circ$); 2) парацентральную область (до $3-6^\circ$); 3) зону оптимальных поворотов (до $12-15^\circ$); 4) область, прилегающую к функциональной границе (до $25-30^\circ$); и 5) зону морфологической границы (до $40-45^\circ$). При выполнении сходных зрительных

задач параметры окуломоторной активности в каждой из зон могут иметь различные значения. Окуломоторное поле асимметрично относительно вертикальной и горизонтальной осей и функционально изменчиво.

Таким образом, в каждый момент времени направленность взгляда *полидетерминирована*, причем уже в следующем микроакте восприятия структура детерминации может быть изменена. Зрительное выделение элемента среды ведет не только к увеличению, но и к уменьшению частоты фиксаций. Используемый наблюдателями способ восприятия играет роль катализатора, усиливающего действие одной из детерминант (или их группы) и меняющего соотношение остальных. В данном контексте степень точности зрительных фиксаций определяется не метрикой их отношения к зрительному направлению предмета восприятия, а положением относительно его «центра тяжести», т. е. является функциональным параметром. С изменением структуры детерминант (даже если проксимальная стимуляция остается той же самой) «эталон точности» направленности глаз меняется.

Механизмы регуляции

Влияние поведенческих детерминант опосредовано собственными механизмами регуляции движений глаз. Без их учета анализ окулограмм оказывается как минимум неполным.

Глазодвигательная система человека представляет собой сложноорганизованное многомерное целое, каждый акт которого складывается в самом процессе зрительного восприятия. Он включает моменты побуждения, прогнозирования, эфферентной готовности, двигательных синергий, полисенсорности и многоуровневости процессов управления. И целенаправленное смещение взгляда, и его устойчивая фиксация подчиняются принципам функциональной системы. В архитектонику окуломоторных актов входят: эфферентный синтез – интеграция исходных предпосылок движений, принятие решения, которое реализуется путем формирования программы поворота глаз и акцептора результата действия, исполнение целенаправленных движений и обратная связь, или реэфферентация, позволяющая контролировать ход выполнения программы. В терминах теории автоматического регулирования ГДС рассматривается как следящая система с отрицательной обратной связью.

Соотношение направленности взгляда с положением головы контролируется системой центрации, которая стремится удержи-

вать глаз в позиции покоя. При неизменном положении головы система центрации ограничивает возможности смещения взора, устанавливая функциональную границу окуломоторного поля.

Зрительная фиксация объекта, или относительная стабилизация направленности взора, осуществляется с помощью разнонаправленного дрейфа и микросаккад. Их соотношение широко варьирует, конституируя индивидуальный тип фиксаций. Параметры (скорость, направление, амплитуда, ускорение) дрейфов и микросаккад тесно связаны с требованиями решаемой задачи, параметрами оптической стимуляции (среды), настройками внимания и др., а их биодинамические возможности в ходе устойчивой фиксации реализуются в зависимости от конкретного сочетания внешних и внутренних условий выполнения окуломоторного акта.

Большая часть фазических микродвижений глаз обеспечивает обследование миниатюрных объектов. Около трети микросаккад корректируют дрейфовые сплывы глаз во время фиксаций. По сравнению с макросаккадами, микросаккады более независимы от параметров среды и более привязаны к центральной точке фиксации.

Нечувствительность ГДС к произвольному смещению оптических осей порождает «зону блуждания» взора. Ее величина редко выходит за пределы 1° , варьируя в зависимости от стимульных условий, решаемой наблюдателем задачи, его состояния и др. обстоятельств. С увеличением продолжительности фиксации или в условиях безориентированного поля зрения она расширяется, при уменьшении размеров объекта восприятия – сужается.

Отсутствие реакции ГДС на небольшие по величине (2–50) оптические изменения среды указывает на существование «мертвого пространства», или зоны нечувствительности сетчатки. Она носит функциональный характер, зависит от способа схематизации зрительного пространства и установок наблюдателя.

При дискоординациях сенсорных и моторных компонентов ГДС запускается адаптивный процесс, направленный на воссоздание согласованности компонентов и оптимальность выполнения перцептивных актов. Окуломоторная адаптация протекает в двух формах: оперативной и консервативной. Оперативное перепрограммирование ГДС выражается в быстрой (практически мгновенной) корректировке параметров цели и критериев оценки результатов движений глаз. Консервативная форма адаптации, предполагает длительную (от нескольких дней) перестройку всей системы обеспечения окуломоторного акта, включая его нормы и эталоны. Условием адаптации ГДС является активное включение субъекта в решение зрительных и двигательных задач. Психологи-

чески и целенаправленный поворот глаз, и устойчивая фиксация строятся как волевое действие, достигающее заданного результата путем преодоления внешне навязанных движений. Этот процесс принимает вид приспособления субъекта к необычным условиям восприятия, зависит от величины рассогласования зрительного и эгоцентрического направлений объекта восприятия и включает этапы: 1) компенсации рассогласования; 2) оптимизации двигательного состава фиксационного поворота глаз и 3) закрепление и стабилизации окуломоторного навыка. В результате адаптации складывается новый «функциональный орган», способный обеспечить оптимальное взаимодействие субъекта восприятия с окружающим миром. В ходе адаптации ГДС выступает в трех ипостасях, как а) поисковая, б) обучающаяся и в) следящая.

Экспериментальный анализ гносеологической функции ГДС – ее способности непосредственно снимать информацию о пространственно-временных свойствах среды – показывает наличие устойчивых рассогласований между направлением взгляда и зрительным направлением объекта. Между восприятием и действием располагается *функциональный зазор*, который характеризует меру относительной независимости параметров зрительного образа от движений глаз и одновременно пространство их ближайших преобразований. В обычной ситуации он проявляется в виде оперативной зоны фиксаций и в зависимости от условий восприятия меняет размер. До тех пор пока рассогласование зрительных и окуломоторных компонентов совершается внутри функционального зазора, оно не оказывает серьезного влияния ни на ход восприятия, ни на характер движений глаз. Лишь выйдя за его пределы, тот или иной параметр окуломоторной активности приобретает статус внешнего, возмущающего перцептивный процесс «лимитирующего» фактора. С этой точки зрения, уподобление отдельных параметров движений глаз пространственно-временным свойствам объекта выражает акт приспособления индивида к среде. Согласованность окуломоторных и собственно зрительных компонентов перцептивного процесса, а не воспроизведение «геометрии предмета» в «геометрии движений (направленности) глаз» является главным условием адекватного представления действительности.

Описанные положения образуют каркас психологической теории окуломоторной активности человека. В ее основе лежит идея системной организации психических явлений (Ломов, 1984, 1996, 2006) и принципы онтологического подхода к исследованию познавательных процессов (Барабанчиков, 2002, 2006, 2011).

* * *

За прошедшие годы российская психология накопила серьезный методический и концептуальный потенциал, ориентированный на решение проблем природы оculoмоторной активности человека и ее использования при решении исследовательских и практических задач. Важным ресурсом дальнейшего развития отечественной науки является освоение новых методов регистрации и оценки движений глаз, опирающихся на широкое использование современных информационных технологий. К их числу относится айтрекинг* – совокупность инструментов и процедур видеорегистрации взгляда человека.

* В широком значении, айтрекинг означает любую процедуру регистрации движений глаз, в узком – ограничен видеорегистрацией.

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ

Бурное развитие вычислительной техники привело к созданию цифровых систем видеорегистрации движений глаз. Использование компьютера для автоматической обработки видеоизображения и, одновременно, – для экспозиции стимульного материала позволяет автоматически вычислять координаты позиции взгляда наблюдателя, определять амплитуду, скорость, направление и другие показатели оculoмоторной активности. Низкая трудоемкость проведения исследования и последующей обработки данных делают такие установки все более популярными.

Принципы работы

Наибольшее распространение в последнее десятилетие получили системы, основанные на регистрации глаз скоростной видеокамерой, работающей в ближнем инфракрасном (IR) диапазоне (850–950 нм). Такая съемка позволяет получить контрастное изображение глаза с четкой границей между зрачком и радужной оболочкой.



Рис. 30. Изображение глаза в ближнем ИК-диапазоне при разном расположении источника света. Фото: Центр экспериментальной психологии МГППУ, оригинальная установка

В зависимости от расположения источника инфракрасной подсветки относительно видеокамеры возможны два случая (рисунок 30). Если источник света расположен в стороне от оптической оси видеокамеры, то отраженный от сетчатки свет не попадает в объектив. В результате на видеоизображении зрачок оказывается темнее, чем радужная оболочка. В англоязычной литературе данный метод получил название *Dark Pupil* (темный зрачок). Если же источник света расположен на оптической оси камеры, отраженный от сетчатки свет попадает в объектив. В результате на видеоизображении зрачок оказывается ярче, чем радужная оболочка. В англоязычной литературе данный метод получил название *Bright Pupil* (яркий зрачок). В фотографии в таком случае говорят об «эффекте красных глаз», часто возникающем при использовании дешевых фотоаппаратов, в которых относительно мощная фотовспышка расположена рядом с объективом.

Полученное видеокамерой изображение передается в компьютер, где происходит его обработка. На изображении выделяются зрачок и роговичный блик (отражение источника света от роговицы глаза). В результате для каждого кадра видеоряда вычисляются: координаты центра зрачка; размеры зрачка по горизонтали и вертикали; координаты роговичного блика.

Задача выделения области зрачка на изображении может решаться двумя путями. *Непараметрические* методы используют при обработке изображения только информацию о разности яркостей. В таком случае зрачком может считаться, вообще говоря, область любой формы, яркость которой ниже заданного порога (для случая темного зрачка – рисунок 31) или выше заданного порога (для случая яркого зрачка).

Такой способ обработки отличается высокой производительностью, но дает корректные результаты лишь при стабильных усло-

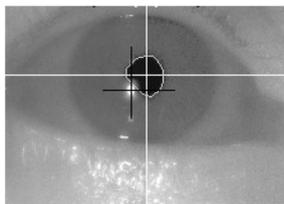


Рис. 31. Обработка изображения с видеокамеры: выделение области зрачка и роговичного блика. Как зрачок выделяется темная область неправильной формы. Установка SMI iViewXtm Hi-Speed 1250 (Центр экспериментальной психологии МГППУ)

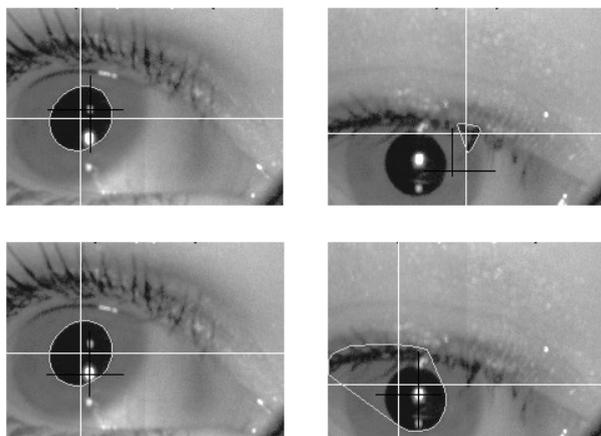


Рис. 32. Артефакты, возникающие при обработке изображения
 Слева – нестабильная детекция роговичного блика, справа – нестабильная детекция зрачка. Установка SMI High Speed, Центр экспериментальной психологии МГППУ.

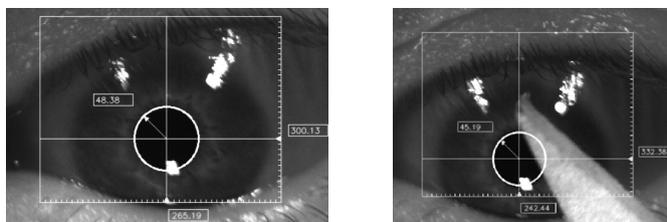


Рис. 33. Обработка изображения с видеокamеры, выделение области зрачка круглой формы

Справа: при появлении в поле зрения камеры хирургического инструмента область зрачка по-прежнему выделяется корректно. Айттрекер Chronos Vision OneK+ с аппаратной обработкой видеоизображений. Иллюстрации из информационного буклета фирмы.

виях экспозиции. Характерным примером нестабильности непараметрических методов обработки является ситуация, возникающая при выделении темного зрачка в случае накрашенных ресниц (рисунок 32). В ближнем инфракрасном диапазоне накрашенные ресницы также видны как темные области на изображении, что затрудняет детекцию зрачка.

Использование *параметрических* методов предполагает, что область зрачка должна не только отличаться по яркости от фона, но и иметь круглую или эллиптическую форму. При таком подходе может обеспечиваться высокая стабильность результатов (рисунок 33); его недостаток – высокая вычислительная сложность.

Для того чтобы соотнести координаты центра зрачка и роговчатого блика на видеоизображении регистрирующей камеры с направлением взгляда наблюдателя, используется процедура калибровки. От наблюдателя требуется последовательно фиксировать взгляд на точечном объекте, показываемом в разных местах экрана компьютера, на котором далее будут экспонироваться изображения, или на реальной калибровочной плоскости (стена, дверь и т. п.) при регистрации движений глаз в свободном поведении. Типичная процедура калибровки включает фиксацию от 5 (одна в центре и четыре – по углам) до 13 калибровочных точек.

Источники помех

Как уже отмечалось, в системах с периферическим расположением источника подсветки, использующих метод Dark Pupil, окрашенные ресницы становятся источником помех, затрудняющим детекцию зрачка. Помимо этого, аналогичные помехи могут создаваться элементами очковой оправы, попадающими в поле зрения регистрирующей видеокамеры. Помехой для уверенной детекции роговчатого блика могут оказаться любые попадающие в кадр дополнительные яркие элементы: отражения от поверхности очков и контактных линз; элементов очковой оправы; засветка от нештатных источников освещения и т. д. На практике компенсация таких помех может осуществляться путем ограничения поля зрения регистрирующей видеокамеры (при наличии возможности соответствующих настроек). Такая настройка, однако, требует значительного времени и нередко приводит к утомлению испытуемого еще до начала основного эксперимента. Исходя из имеющегося опыта, при проведении массовых айтрекинговых исследований оптимальной стратегией является отказ от использования испытуемых, индивидуальные особенности которых затрудняют видеорегистрацию движений глаз.

Некорректная регистрация движений глаз происходит также в случае, когда испытуемый в ходе продолжительной записи меняет стиль рассматривания, опуская вниз свои веки. В таком случае (в особенности при наличии длинных ресниц, пусть даже и ненакрашенных) детекция изображения зрачка оказывается невозмож-

ной. Экспериментатор вправе попросить испытуемого «открыть глаза», однако такой прием не всегда оказывается действенным.

Изменение положения головы испытуемого в ходе видеорегистрации движений глаз также может привести к искажениям в записи, вызванным изменением расположения глаз испытуемого относительно регистрирующей камеры. Оптимальным решением здесь представляется предварительное инструктирование испытуемого с объяснением особенностей работы оборудования. Также возможно введение в эксперимент дополнительных «контрольных точек», по достижении которых оператор может проконтролировать направление взора испытуемого (например, при концентрации внимания на центральной фиксации точки) и, в случае необходимости, заново выполнить калибровку. Следует иметь в виду, что в силу усталости испытуемого повторная калибровка не всегда проходит успешно.

Возможности системы регистрации глаз характеризуются двумя показателями: точностью (accuracy) и стабильностью (precision). *Точность* показывает, насколько определенное системой направление взора наблюдателя отличается от фактического. Помимо технических параметров установки, точность определяется также физиологическими особенностями зрения, в частности угловыми размерами фовеальной области. Типичная точность определения направления взора составляет $0,25-0,5^\circ$, причем достигнуть лучшей точности за счет совершенствования оборудования практически невозможно. *Стабильность* регистрации движений глаз численно характеризуется величиной стандартного отклонения при удержании внимания на неподвижной фиксации точки либо при выполнении записи колебаний неподвижного искусственного глаза. Производители оборудования в маркетинговых целях некорректно обозначают данный показатель как «пространственное разрабление». Для лучших систем видеорегистрации движений глаз стабильность может составлять $0,01^\circ$.

Успешное проведение исследования, включающего видеорегистрацию движений глаз, возможно только при тщательном учете факторов, которые могут повлиять на качество регистрируемых данных. При работе на стационарном оборудовании наиболее существенным источником помех являются индивидуальные особенности испытуемых. При работе с использованием мобильного оборудования основная сложность связана с наличием неконтролируемых источников освещения.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ

На сегодняшний день наибольшее распространение получили два основных типа оборудования для видеорегистрации движений глаз. Первый – стационарные установки, в которых предъявление изображений выполняется на экране монитора, причем положение регистрирующей камеры относительно экрана жестко фиксировано, а наблюдатель в ходе исследования должен неподвижно сидеть перед экраном. Второй – мобильные системы, в которых регистрирующая видеокамера зафиксирована на голове наблюдателя с помощью очковой оправы, велошлема и т. п. В последнем случае система включает вторую камеру – т. н. «камеру сцены», ведущую видеосъемку с позиции наблюдателя, к изображению которой привязывается направление взора. Выбор используемого оборудования определяется целями и задачами проводимого исследования.

Стационарные системы

В тех случаях, когда необходима максимальная пространственная и временная разрешающая способность, используются стационарные системы, в которых голова испытуемого фиксируется лобно-подбородной опорой (иногда дополнительно используется зажимаемый во рту зубной слепок). Регистрирующая камера может быть либо направлена непосредственно в глаза испытуемого, либо расположена вертикально в верхней части установки. В последнем случае для получения изображения глаз используется так называемое «теплое зеркало», отражающее инфракрасное излучение и пропускающее видимый свет. Зеркало укрепляется наклонно перед глазами; так что наблюдатель видит через него экспонируемое на экране изображение, а на камеру попадает отраженное от зеркала изображение глаз.

Основная область исследований с применением данного оборудования – разнообразные феномены окуломоторной активности в микроинтервалах времени, механизмы регуляции движений глаз, динамика познавательных процессов и функциональных состояний человека. Высокая разрешающая способность позволяет детально изучать саккадические и прослеживающие движения глаз; работать в условиях кратковременной (менее 1 с) экспозицией изображений, в том числе в рамках gaze contingent paradigm; выделять характерные особенности движений глаз, связанные с различными заболеваниями и др.

Требование жесткой фиксации головы наблюдателя существенно ограничивает возможности коммуникации и действия в ходе исследования. Рассмотрим примеры систем данного класса более подробно.

EyeLink 1000 (Tower Mount). Установка (рисунок 34) производится канадской фирмой SR Research; на сегодняшний день обладает наилучшим временным и пространственным разрешением. Заявленные производителем характеристики:

- Максимальная точность определения направления взора: до $0,15^\circ$;
- Типичная точность определения направления взора: $0,25-0,5^\circ$;
- Частота видеорегистрации: 1000 Гц (с опцией EyeLink 2000 – до 2000 Гц);
- Стабильность: $0,01^\circ$ при 1000 Гц; $0,02^\circ$ при 2000 Гц (при тестировании с помощью искусственного глаза);
- Диапазон регистрации движений глаз: $\pm 27,5^\circ$ по горизонтали, $\pm 22,5^\circ$ по вертикали;
- Точность измерения величины зрачка: не хуже $0,2\%$ диаметра.

Видеокамера подсоединена по интерфейсу CameraLink к компьютеру, работающему в однозадачном режиме под управлением операционной системы Romdos 7.1, что обеспечивает высокую стабильность работы. При частоте регистрации 1000 Гц средняя латентность обработки видеокадра $M < 1,8$ мс ($SD < 0,6$ мс); при 2000 Гц $M < 1,4$ мс ($SD < 0,4$ мс).

iViewXtm Hi-Speed 1250. Флагманская модель немецкой фирмы SensoMotoric Instruments (рисунок 35). Заявленные характеристики:

- Типичная точность определения направления взора: $0,25-0,5^\circ$;
- Частота видеорегистрации: 1250 Гц (монокулярная), 500 Гц (монокулярная и бинокулярная);
- Стабильность: $0,01^\circ$;
- Диапазон регистрации движений глаз: 30° (влево, вправо, вверх), 45° (вниз).

Видеокамера подсоединена по интерфейсу CameraLink к компьютеру, работающему под управлением Windows XP. Производителем

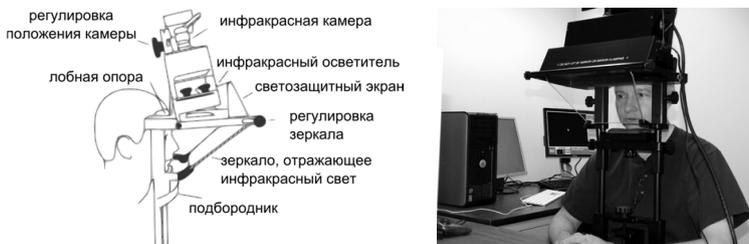


Рис. 34. Установка SR Research EyeLink 1000, Tower mount

Слева – адаптированная схема с сайта фирмы-производителя, справа – установка в University of Victoria (Canada), Cognition and Action Laboratory (фото с сайта университета).



Рис. 35. Установка SMI iViewXtm Hi-Speed 1250 (Центр экспериментальной психологии МГППУ)

отдельно указываются латентность обработки (Processing latency) < 0,5 мс и латентность системы (System latency) < 2 мс. В имеющемся в нашем распоряжении экземпляре установки используется видеочамера Pulnix TM-6740CL. Разрешение: 224×160 (монокулярный режим, 500 Гц и 1250 Гц), 640×160 (бинокулярный режим, 500 Гц).

Для исследований, не требующих высокого пространственного разрешения, предлагаются стационарные системы без фиксации головы испытуемого. По утверждениям производителей, регистрация движений глаз возможна при смещениях головы порядка 20 см от положения, при котором выполнялась калибровка. На практике, однако, оказывается, что удержание даже относительно стабильного положения головы в ходе исследования требует от его участников значительного напряжения. Оптимальные условия, в которых возможна продолжительная стабильная запись движений глаз (порядка 30 мин и более), достигаются при использовании невращающегося анатомического кресла с подголовником. Регистрирующие видеочамеры таких установок монтируются под экраном монитора или свободно стоят на столе. Системы данного класса получили широкое распространение.



Рис. 36. Установка EyeLink 1000 Desktop Mount. Психологический факультет МГУ, Лаборатория психологии труда

Слева общий вид установки, справа – интерфейс ПО (регистрация движений глаз выполняется с использованием головы-манекена).

Оборудование предназначено для изучения и диагностики познавательных процессов, деятельности и общения. Удачным компромиссным решением, сочетающим относительно высокие технические характеристики с возможностью свободного расположения испытуемого, являются системы с частотой регистрации 500 Гц (Eye Link 1000 Desktop Mount, SMI RED 500 – см. далее), позволяющие в принципе выполнять весь возможный спектр исследований. Рассмотрим несколько наиболее известных моделей.

EyeLink 1000 Desktop Mount с опцией Remote Camera Upgrade.

Установка фирмы SR Research, предназначенная для записи движений глаз в условиях не стабилизированного положения головы (рисунок 36). Для точного определения положения головы на лоб наблюдателя наклеивается круглая метка-мишень. Заявленные характеристики:

- Максимальная точность определения направления взгляда: до 0,15°;
- Типичная точность определения направления взгляда: 0,5°;
- Частота видеорегистрации: 500 Гц (монокулярный режим);
- Стабильность: 0,05°;
- Диапазон регистрации движений глаз: ±17° по горизонтали; ±22,5° по вертикали;
- Диапазон свободного перемещения головы: 22×18×20 см;
- Расстояние от глаз наблюдателя до экрана: 40–70 см.

На практике запись движений глаз на данной установке при нестабилизированном положении головы оказывается некомфортной для испытуемых, поскольку в отсутствии опоры сильно напрягаются мышцы спины и шеи.

SMI RED / RED 250 / RED 500. Линейка установок фирмы Sensomotoric Instruments, различающихся максимальной частотой



Рис. 37. Установка SMI RED500. Фото из проспекта фирмы-производителя

той видеорегистрации. Видеокамера расположена в специальном закрытом блоке под экраном монитора (рисунок 37). Заявленные характеристики:

- Точность определения направления взгляда: $0,4^\circ$;
- Частота видеорегистрации: 50/60 Гц (RED); 60/120/250 Гц (RED 250); 60/120/250/500 Гц (RED 500) (монокулярный и бинокулярный режимы);
- Стабильность: $0,03^\circ$;
- Диапазон регистрации движений глаз: 20° (влево, вправо, вверх); 40° (вниз);
- Диапазон свободного перемещения головы: 40×20 см на дистанции 70 см;
- Расстояние от глаз наблюдателя до экрана: 60–80 см.

SMI RED-m. Младшая модель айтрекера фирмы Sensomotoric Instruments, отличающаяся максимальной компактностью (рисунок 38). Позволяет выполнять регистрацию движений глаз при рассматривании изображений на экране ноутбука или стационарного монитора (диагональ 10–22"). Заявленные характеристики:

- Точность определения направления взгляда: $0,5^\circ$;
- Частота видеорегистрации: 60/120 Гц (регистрируются усредненные координаты взгляда левого и правого глаза);
- Стабильность: $0,1^\circ$;



Рис. 38. Установка SMI RED-m. Фото из рекламного ролика фирмы-производителя

- Латентность: не более 20 мс при частоте регистрации 60 Гц;
- Диапазон свободного перемещения головы: 32×21 см на дистанции 60 см;
- Расстояние от глаз наблюдателя до экрана: 50–75 см;
- Вес: 130 г;
- Размеры: 24×2,5×3,3 см.

Eyegaze Analyzing System. Установка немецкой фирмы Interactive Minds. Под экраном монитора расположены две видеокамеры, работающие на частоте 60 Гц, отдельно регистрирующие изображение с левого/правого глаза (рисунок 39). Светодиоды инфракрасной подсветки расположены по центру объектива каждой из камер, обеспечивая работу в режиме «яркого зрачка». Итоговая запись содержит усредненное направление взгляда для левого и правого глаз с частотой 120 Гц. Раздельная регистрация направления взгляда для левого и правого глаза невозможна. Заявленная точность определения направления взгляда – $0,4^\circ$.

Eyefollower™ 2.0. Установка фирмы Interactive Minds, оснащенная системой сервоприводов, управляющих положением и фокусировкой камер, регистрирующих направление взгляда (рисунок 40). Частота регистрации – 120 Гц, точность определения направления взгляда – $0,4^\circ$. Заявленный производителем диапазон положе-



Рис. 39. Установка Eyegaze Analyzing System. Институт психологии РАН, лаборатория познавательных процессов и математической психологии



Рис. 40. Установка Eyefollower™ 2.0. Фото из проспекта фирмы-производителя



Рис. 41. Установка Smart Eye Pro. Фото из проспекта фирмы-производителя

ний, в котором стабильно выполняется регистрация движений глаз: 76 см по горизонтали, 40 см по вертикали, расстояние до экрана – от 46 до 97 см.

Smart Eye Pro 5.10. Полипозиционная система регистрации движений глаз шведской фирмы Smart Eye AB (рисунок 41); поддерживается одновременная работа до 8 видеочкамер. Частота регистрации – 120 Гц (до 4 камер) / 60 Гц (до 8 камер). Точность определения направления взгляда – $0,5^\circ$. Точность определения положения головы наблюдателя: поворот – $0,5^\circ$, смещение – 1 мм. В максимальной комплектации обеспечивается круговое поле зрения (360°). Система позволяет задавать «модель мира» и привязывать направление взгляда наблюдателя к объектам и зонам созданной модели. Диапазон положений головы наблюдателя, в котором стабильно выполняется регистрация движений глаз для системы из двух камер – $40 \times 40 \times 30$ см. Дистанция от камеры до глаз наблюдателя – от 30 до 300 см (со сменной оптикой и системами подсветки).

На базе айтрекера создана специализированная система предотвращения засыпания водителя AntiSleep, выполняющая непрерывную детекцию положения головы, направления взгляда и раскрытия глаз с частотой 60 Гц. Для работы системы необходим стандартный ноутбук. Диапазон свободного перемещения головы: $20 \times 15 \times 20$ см; точность определения направления взгляда – $1,5^\circ$; точность определения положения головы – 3° .

Мобильные системы

Для регистрации движений глаз в свободном поведении используются мобильные системы видеорегистрации движений глаз, укрепляемые на голове наблюдателя. В простейшем случае мобильная система имеет две камеры. Первая непосредственно или через полупрозрачное «теплое зеркало» регистрирует движения глаз. Вторая – камера сцены – записывает видеоизображение окружающей среды с позиции наблюдателя. Результат регистрации представляет

видеоряд с отметкой направления взгляда на каждом кадре. Принципиальным недостатком мобильных систем является крайне высокая трудоемкость анализа, фактически сводящаяся к покадровому анализу видеоизображения. Для облегчения работы оператора привлекаются различные программные средства (системы аннотирования, разметка динамических зон интереса и др.). Наиболее эффективно мобильные системы могут быть использованы в закрытых помещениях со стабильными условиями освещения. Засветка регистрирующей движения глаз камеры мощным источником света (солнце, прожектор, фары встречного автомобиля и т. п.) нарушает работу установки. Необходимо отметить, что монокулярная мобильная система корректно выполняет привязку направления взгляда наблюдателя к изображению камеры сцены только на том расстоянии, на котором выполнялась процедура калибровки. Биноклярные системы, способные регистрировать в том числе и вергентные движения глаз и тем самым автоматически рассчитывать расстояние до рассматриваемого наблюдателем объекта, теоретически должны быть свободны от этого недостатка.

Оборудование данного типа применяется, как правило, в исследованиях конкретных практических задач, связанных с определенными видами деятельности и общения. Наилучшим выбором здесь являются максимально компактные устройства, выполненные в виде очков, минимально ограничивающие свободу перемещений испытуемого. Их применение гарантирует высокую экологическую валидность исследования. Использование мобильных систем в исследованиях, связанных с изучением собственно механизмов окулomotorной активности человека нецелесообразно в силу низкого пространственного разрешения и крайне высокой трудоемкости последующей обработки данных. Рассмотрим несколько систем данного класса более подробно.

NAC EMR-9. Японская фирма NAC Image Technology – старейший производитель мобильных систем регистрации движений глаз, хорошо зарекомендовавшая себя и в нашей стране. NAC EMR-9 – первая в линейке модель с компьютерной регистрацией, выпускается с 2008 г. (рисунок 42). Заявленные производителем характеристики:

- Регистрация в монокулярном или биноклярном режиме в зависимости от комплектации;
- Монтировка на кепку или очковую оправу, регистрирующие камеры направлены непосредственно в глаза наблюдателя;
- Частота видеорегистрации: 60/120/240 Гц (монокулярно/биноклярно);
- Стабильность: 0,1°;



Рис. 42. Установка NAC EMR 9. Фото с новостного сайта <http://prw.kyodonews.jp>

- Точность измерения диаметра зрачка: 0,02 мм;
- Диапазон регистрации движений глаз: $\pm 40^\circ$ по горизонтали, $\pm 20^\circ$ по вертикали;
- Видео: 640×480, MPEG4;
- Угол обзора камеры сцены: 44° (стандарт), 62°, 92°, 121° (опционально);
- Вес айтрекера: 75 г (очки) / 150 г (кепка);
- Регистрирующий блок: 85×147×63 мм, вес – 590 г, время автономной работы – 90 мин.

iViewXtm HED. Мобильная система фирмы SensoMotoric Instruments, устанавливаемая на кепку или велосипедный шлем (рисунок 43). Запись выполняется только в монокулярном режиме. Перед глазом наблюдателя наклонно ставится «теплое зеркало», отраженное изображение регистрируется видеокамерой. В комплект поставки входят зеркала для левого и правого глаза (различающиеся положением скошенной части). В качестве регистрирующего модуля используется ноутбук. Корректное определение направления взгляда возможно только для объектов, находящихся на том же расстоянии, на котором выполнялась процедура калибровки. Дополнительно установка может комплектоваться 6D системой трекинга головы, позволяющей в случае фиксированного окружения выполнять привязку направления взгляда к заранее определенным прямоугольным



Рис. 43. Установка SMI iViewXtm HED. Центр экспериментальной психологии МГППУ

зонам (например, лежащая на столе газета, экран компьютера, плакат на стене и т. д.). На практике данная опция требует скрупулезной предварительной калибровки воспринимаемой среды. После калибровки какие-либо перемещения элементов окружающей среды недопустимы. Это означает, что при использовании данной системы мобильность наблюдателя оказывается ограниченной. Заявленные производителем характеристики:

- Частота видеорегистрации: 60/200 Гц монокулярно; запись звука – только при частоте регистрации 60 Гц;
- Точность определения направления взора: 0,5–1°;
- Пространственное разрешение: 0,1°;
- Видео: 720×564, MPEG4;
- Угол обзора камеры сцены: в комплекте поставляются три объектива; фокусные расстояния 3,6 мм, 6 мм, 8 мм; углы обзора составляют соответственно ±33°, ±22°, ±15°.

SMI Eyetracking glasses. Новая модель мобильной системы фирмы *SensoMotoric Instruments*, выпускаемая с 2011 г. (рисунок 44). Собственно, айтрекер представляет собой очки, в которые вмонтированы камеры, регистрирующие движения глаз, и камера сцены. Регистрирующее устройство – компактный носимый модуль. Данную систему можно считать полностью мобильной, практически не ограничивающей подвижность наблюдателя. Продуманный дизайн системы не привлекает излишнего внимания окружающих. Использование многоточечной инфракрасной подсветки (по 6 светодиодов на каждый глаз) значительно повышает стабильность работы в сложных условиях. Биноклярный режим работы позволяет обеспечить компенсацию параллакса. Недостатком является относительно узкий угол обзора камеры сцены. Заявленные производителем характеристики:

- Частота видеорегистрации: 30–60 Гц;
- Точность определения направления взора: 0,5° (на любой дистанции);
- Стабильность: 0,1°;
- Диапазон регистрации движений глаз: ±40° по горизонтали, ±20° по вертикали;
- Видео: 1280×960, 24 fps, H264;
- Угол обзора камеры сцены: 60°×46°;
- Размеры регистрирующего модуля: 178×85×26,5 мм, вес – 438 г.

Апробация возможностей использования очков для записи движений глаз пилота показала, что система удобна в работе, легко калибруется и стабильно работает в условиях значительных перепа-



Рис. 44. Установка SMI Eye Tracking glasses. Фото из проспекта фирмы-производителя

дов яркости окружающей среды. Использование очков достаточно удобно и не создает помех пилотированию.

Таким образом, современное айтрекинговое оборудование может быть успешно использовано при проведении лабораторного исследования с предъявлением заранее подготовленного стимульного материала на экране монитора. Оборудование позволяет выполнять регистрацию движений глаз у большинства испытуемых, ограничения связаны в первую очередь с накрашенными ресницами и использованием бифокальных очков, либо очков, конструктивные элементы которых попадают в поле зрения регистрирующие камеры. Пространственная и временная разрешающая способность оборудования достаточна для проведения дальнейшего анализа окулomotorной активности на уровне последовательности фиксации. Анализ динамики саккад и следящих движений возможен в ограниченном объеме и только с применением оборудования с максимальной возможной разрешающей способностью. Регистрация движений глаз в свободном поведении выполняется с помощью мобильных систем. Основные трудности таких исследований на этапе проведения эксперимента связаны с необходимостью обеспечения продолжительной автономной работы устройства; резкими изменениями условий освещения, нарушающими стабильность регистрации; изменением расстояния от наблюдателя до рассматриваемых объектов, приводящим к снижению точности определения направления взора. На этапе обработки данных анализ записей с мобильных айтрекинговых систем отличается крайне высокой трудоемкостью, связанной с необходимостью многократной ручной разметки воспринимаемого изображения.

Безопасность использования систем видеорегистрации движений глаз

В современных системах видеорегистрации используется светодиодная подсветка в ближнем инфракрасном диапазоне (850–950 нм), который вплотную примыкает к видимому свету (длина волны

600–700 нм). Ближнее инфракрасное излучение имеется в солнечном спектре и в спектре ламп накаливания, так что его воздействие является естественным для человеческого организма. Однако естественные источники, наряду с ближним инфракрасным излучением, содержат и видимый свет, интенсивность которого можно непосредственно оценить и, соответственно, адаптироваться к яркому свету или избежать его воздействия. В случае осветительных приборов, излучающих только в ближнем инфракрасном диапазоне, наблюдатель не в состоянии непосредственно оценить интенсивность излучения. Работающий ИК светодиод с длиной волны 850 нм воспринимается как источник слабого розоватого света; излучение светодиода с длиной волны 950 нм никак не замечается, так что отличить работающий светодиод от выключенного визуально невозможно.

Согласно рекомендациям международной комиссии по защите от неионизирующего излучения ICNIRP, выделяются два источника потенциального риска: термический ожог роговицы и хрусталика и термический ожог сетчатки.

Для предотвращения термического ожога роговицы и хрусталика регламентируется предельная максимальная освещенность (плотность потока), создаваемая инфракрасным излучением в диапазоне 780–3000 нм, которая не должна превышать 10 мВт/см^2 при времени экспозиции более 1000 с.

Для предотвращения термического ожога сетчатки регламентируется максимальная энергетическая яркость источника. Для источника освещения с угловыми размерами, превышающими $0,1$ радиана безопасный уровень яркости не должен превышать $6 \text{ Вт*см}^2*\text{ср}^{-1}$ при времени экспозиции более 810 с. Для источников с меньшими угловыми размерами безопасный уровень яркости составляет $0,6/\alpha \text{ Вт*см}^2*\text{ср}^{-1}$, где α – угловой размер в радианах. Для источников с угловыми размерами менее $0,011$ радиана безопасный уровень яркости принимается $0,6 \text{ Вт*см}^2*\text{ср}^{-1}$.

Существующие нормы безопасной освещенности источником инфракрасного излучения подразумевают относительно кратковременное однократное воздействие. В случае использования систем видеорегистрации движений глаз в качестве компьютерного интерфейса воздействие источника ИК-излучения приобретает хронический характер. Основным фактором риска при использовании систем видеорегистрации является близкий к предельно допустимому значению уровень освещенности. Привлечение взрослых испытуемых к повторным (в течение короткого промежутка времени) исследованиям (детей – к любым айтрекинговым

исследованиям) допустимо только в случае использования стационарных низкоскоростных систем. При этом дистанция от камеры и системы подсветки до лица испытуемого должна составлять порядка 60 см. Продолжительное применение управляемых взором компьютерных интерфейсов этически оправдано только в случае, когда полностью исключена потенциальная возможность использования других способов управления компьютером.

Перспективы развития айтрекингового оборудования определяются широкими возможностями его применения при решении практических задач, связанных с дистанционным характером регистрации. В этом отношении видеорегистрация движений глаз выгодно отличается от контактных аппаратурных методик, таких как регистрация ЭМГ, КТР, ЭКГ или ЭЭГ.

ПРЕДЪЯВЛЕНИЕ СТИМУЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Наиболее распространенный тип айтрекингового исследования предполагает рассматривание наблюдателем изображений на экране компьютера. Выбор программного обеспечения (ПО), обслуживающего экспозицию материала в таких исследованиях, определяется, с одной стороны, структурой проводимого исследования, с другой – удобством и легкостью освоения соответствующего программного обеспечения.

Стандартное и альтернативное программное обеспечение

Как правило, для предъявления одиночных статических изображений: текста, интернет-страниц, фрагментов видео, меню, позволяющих выбрать один из вариантов ответа, и т. п. достаточно штатного программного обеспечения, поставляемого производителем установки. Разумеется, необходимо заранее уточнить наличие соответствующего ПО и его функциональные возможности, выяснить пути дальнейшего обновления.

В более сложных случаях, когда требуется тахистоскопическое предъявление изображений, точная регистрация времени реакции, проведение исследования типа Gaze Contingent Paradigm, экспозиция статических стереоизображений и фрагментов стереофильмов, использование игровых программ, авто- и авиасимуляторов, исследование ВСИ-интерфейса и т. п., возможностей приобретаемого вместе с установкой ПО, скорее всего, будет недостаточно. В этих случаях необходимо обратить внимание на возможности айтрекера в части взаимодействия штатного ПО с альтернативным программным обеспечением. Рассмотрим основные принципы такого взаимодействия.

В ходе работы установки происходит взаимодействие двух компьютерных программ. Первая (разработанная производителем оборудования) отвечает за управление оборудованием, настройку его параметров, регистрацию и сохранение данных. Вторая (может быть создана как производителем оборудования, так и независимым разработчиком) обеспечивает задание последовательности экспозиций изображений, рассматриваемых наблюдателем, и фиксацию его действий. Будем далее называть эти программы «Регистратор» и «Проектор» (очевидно, что в разных системах фактические названия программ будут различаться). В процессе эксперимента «Проектор» должен передавать «Регистратору» указания «начать запись», «остановить запись», а также синхронизационные метки, соответствующие моментам смены экспонируемого изображения и действиям наблюдателя. В некоторых случаях необходима также обратная передача от «Регистратора» к «Проектору» сведений о текущем направлении взгляда наблюдателя.

Возможны три основных канала взаимодействия между «Регистратором» и «Проектором». Первый – обмен с использованием внутренних интерфейсов программы «Регистратора», так называемых API (Application Programming Interface). В таком случае производитель системы включает в поставку описание API и необходимые компоненты для разработки программного обеспечения с его использованием. На практике данный подход значительно ограничивает возможности создания нового программного обеспечения. Следует исходить из того, что корректно использовать API, скорее всего, удастся только с использованием той же среды разработки, которую использовал производитель.

Второй канал – использование стандартных аппаратных интерфейсов. Обмен информацией в таком случае может выполняться через локальную сеть, последовательный или параллельный порты. Производитель при этом должен описать используемые команды и формат данных. Дополнительно может быть предоставлен SDK (Software Development Kit) для решения типовых задач. Данный подход создает максимальную гибкость и не накладывает никаких ограничений на программно-аппаратную платформу, на которой будет работать программа «Проектор».

Третий канал – включение в систему видеорегистрации движений глаз специализированных интерфейсных карт, сигналы от которых обрабатываются программой «Регистратором». В таком случае отметкой о смене изображения может быть TTL-импульс на одном из входов интерфейсной карты. Наличие такой возможности оказывается полезным при разработке аппаратурной системы предъявления стимульного материала.

Используя оригинальный API или стандартные интерфейсы, производитель может обеспечить возможность использования в качестве «Проектора» стандартных коммерческих программ для проведения психофизических исследований, таких как E-Prime (Psychology Software Tools) и Presentation (Neurobehavioral Systems). С их помощью можно, в частности, выполнять тахистоскопическую экспозицию изображений (до одного кадра экранной развертки включительно), конструировать психофизические эксперименты, выполнять некоторые исследования в рамках Gaze Contingent Paradigm. В некоторых случаях также возможно использование аналогичных Open Source программ, в частности OpenSesame (osdoc.cogsci.nl) и OGAMA (www.ogama.net). К сожалению, большинство Open Source программ, ориентированных на проведение психологических исследований, например: PXLab (www.pxlab.de), PsychoPy (www.psychopy.org), VisionEgg (www.visionegg.org), Pebl (pebl.sourceforge.net) – не имеет штатных возможностей взаимодействия с айтрекерами, что, однако, не исключает принципиальной возможности их доработки.

При подготовке оригинального экспериментального исследования возможностей специализированных систем может оказаться недостаточно. В таком случае следует обратить внимание на интерпретируемые языки программирования общего назначения, такие как Python, Action Script, MathLab, LabView и др. Гибкость использования и широкий набор функциональных возможностей позволяют реализовать с их помощью достаточно сложные компьютерные эксперименты. Программирование с использованием классических компилируемых языков оправдано в случае, если эксперимент реализуется в игровой форме с использованием трехмерной анимации (Колтунова и др., 2012).

Таким образом, при выборе оборудования необходимо предварительно изучить возможности штатного ПО, а также средства, предоставляемые производителем для создания альтернативных программ, обеспечивающих предъявление стимульного материала. Оптимальным вариантом является наличие штатной поддержки коммерческих психофизических пакетов и возможности использования стандартных интерфейсов.

Средства создания экспериментов в программно-аппаратных комплексах

В качестве примера рассмотрим более подробно возможности проведения экспериментальных айтрекинг-исследований с использованием оборудования фирмы Sensomotoric Instruments.

Простейший способ конструирования эксперимента состоит в использовании фирменного программного обеспечения Experiment Center. С его помощью участникам исследования можно демонстрировать статические изображения, фрагменты текста, видеоролики, интернет-страницы. В последовательность демонстрируемых изображений можно включать страницы-опросники, на которых можно мышкой выбрать один из ответов. Обратная связь с айтрекером ограничивается возможностью создания «целевых областей», на которые обязательно необходимо посмотреть в течение заданного времени. В частности, такие «целевые области» могут быть использованы для того, чтобы убедиться, что наблюдатель действительно смотрел на фиксационную точку.

Для создания более сложных исследовательских парадигм может быть использован SMI IViewX™ SDK. SDK (Software Development Kit) представляет собой средство для эффективной разработки собственного программного обеспечения, взаимодействующего с айтрекером. Взаимодействие реализуется путем вызова функций, включенных в библиотеку SDK. Данный набор функций позволяет устанавливать параметры работы оборудования, проводить процедуру калибровки, передавать информационные сообщения о смене изображения и действиях пользователя, получать координаты зрака наблюдателя. С помощью SDK возможна разработка программ на C#, Python, Matlab. Кроме того, на его основе реализованы интерфейсы для пакетов E-Prime и NBS Presentation, что позволяет эффективно использовать данное ПО в айтрекинговых исследованиях. В частности, появляется возможность точно контролировать время экспозиции и время реакции.

Более низкий уровень взаимодействия с айтрекером обеспечивается открытым протоколом IViewX Remote Commands. Набор доступных команд обеспечивает ту же функциональность, что и SDK, но данный способ работы более сложен в реализации и в то же время обеспечивает большую гибкость работы, позволяя использовать любые языки программирования. С использованием протокола IViewX Remote Commands реализована, в частности, поддержка оборудования SMI в свободно распространяемом (open source) ПО OGAMA (open gaze and mouse analyzer) и OpenSesame. OGAMA представляет собой универсальное ПО, обеспечивающее проведение экспериментов и анализ данных с использованием ряда коммерческих айтрекеров (Mirametrix, Alea Technologies, Tobii, ASL, SMI), а также open source айтрекера ITU Gaze Tracker, ориентированного на использование бытовых веб-камер. Возможности OGAMA в части конструирования экспериментов сопоставимы

с возможностями SMI Experiment Center (экспозиция статических изображений, текста, видеороликов). OpenSesame представляет собой универсальный конструктор психологических исследований с удобным интерфейсом и широкой функциональностью, сопоставимой с коммерческими пакетами. К сожалению, в настоящее время функциональность модуля, обеспечивающего взаимодействие с айтрекерами SMI, в OpenSesame весьма ограничена. В частности, взаимодействие с айтрекером реализовано только через последовательный интерфейс (COM-порт), но не через локальную сеть.

Следует отметить, что исторически протокол IViewX Remote Commands был реализован фирмой SMI раньше, чем основанный на нем SDK. Поэтому выполняемые в настоящее время в Центре экспериментальной психологии МГППУ айтрекинговые исследования, требующие такого уровня организации эксперимента, который выходит за рамки возможностей Experiment Center, реализованы с использованием протокола IViewX Remote Commands.

Недостатком протокола IViewX Remote Commands и основанного на нем SDK является то, что управление передачей сообщений осуществляется программно. Поскольку современные персональные компьютеры, работающие под управлением массовых операционных систем Windows и Linux, не являются системами реального времени, интервал между передачей сообщения о смене экспонируемого изображения и фактическим моментом его смены может достигать нескольких десятков миллисекунд. Уменьшение латентности может быть достигнуто путем предварительной записи экспонируемого изображения в неотображаемые страницы видеопамяти и последующего переключения страниц видеопамяти в момент появления сигнала вертикальной развертки, сигнализирующего о начале очередного цикла отображения видеопамяти на экране монитора. Данный прием не дает, однако, 100% гарантии, поскольку управляющая экспериментом программа выполняется в мультизадачной операционной системе.

Данная проблема не является специфической для айтрекинговых исследований. Точная синхронизация предъявляемого стимульного материала с регистрируемыми данными необходима также в ЭЭГ исследованиях. Способ обеспечения такой синхронизации также хорошо известен. Усилитель ЭЭГ сигнала содержит дополнительный вход синхронизации, на который подается сигнал от оптического датчика, закрепленного на экране монитора. Предъявление целевого изображения сопровождается одновременной экспозицией оптического строба (смена черного поля на белое) в зоне расположения датчика.

В айтрекере SMI Hi-Speed предусмотрена возможность приема сигналов синхронизации с использованием отдельной платы АЦП. На внешний разъем DB-38F выведено 16 TTL-входов, причем синхронизация может осуществляться по обоим фронтам сигнала (смена уровня «0» на «1» и смена «1» на «0»). Выполненная нами проверка показала, что латентность обработки поступающего сигнала не превышает времени обработки одного сэмпла данных. К сожалению, необходимый для выполнения синхронизации оптический датчик в комплект поставки не входит. Использование датчика VGASens, которым комплектуются энцефалографы Нейровизор, потребовало бы организации специального переходника. Кроме того, выпускаемая в настоящее время модель датчика получает питание от входа синхронизации энцефалографа.

Для работы с айтрекером SMI Hi-Speed нами был разработан оптический датчик, получающий питание (5 В) от свободного USB-входа компьютера (рисунок 45). Датчик выполнен на основе микроконтроллера AtTiny2313. В качестве детектора уровня освещенности используется фототранзистор, подключенный к одному из входов контроллера и «земле». В отсутствие засветки на входе микроконтроллера имеется напряжение, соответствующее уровню «1», обеспечиваемое резистором подтяжки, подключенном к уровню +5 В. При предъявлении целевого изображения черное поле сменяется белым, фототранзистор засвечивается, его сопротивление уменьшается, уровень напряжения на входе становится равным

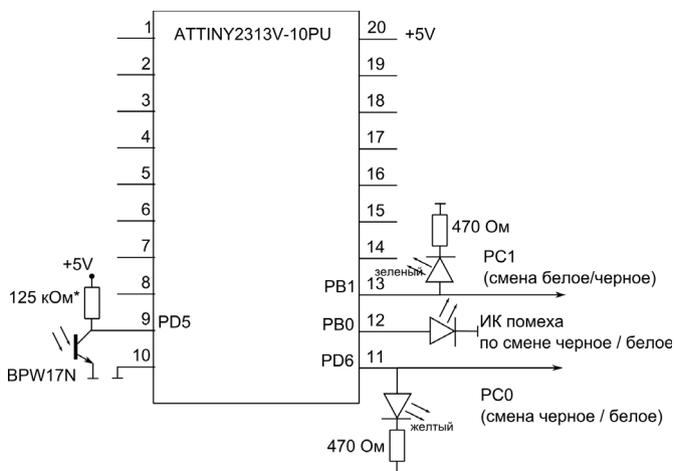


Рис. 45. Схема оптического датчика, подключаемого к айтрекеру SMI Hi-Speed

«0». Смена уровня с «1» на «0» обнаруживается микропрограммой контроллера, которая выдает на подключенный к АЦП айтрекера выход контроллера короткий TTL-импульс. Смена на входе «0» на «1», означающая завершение предъявления целевого изображения, приводит к выдаче TTL-импульса на другой вход АЦП. С целью контроля латентности ПО iViewX в момент засветки фототранзистора может дополнительно загораться инфракрасный светодиод, дополнительно освещающий глаза наблюдателя, что увеличивает яркость видеоизображения и приводит к кратковременному сбою в детекции позиций зрачка и роговичного блика, отражающемуся в регистрируемых данных. Данная схема допускает дальнейшую доработку, обеспечивающую одновременное использование нескольких оптических сенсоров.

Айтрекинговые исследования зрительного восприятия объектов, зависящих от направления взора (gaze contingent paradigm)

Исследования данного типа предполагают отслеживание в реальном времени направление взора наблюдателя и формирование изображения объекта на основе информации о направлении взора. Проведение подобных исследований возможно только в случае низкой латентности как системы детекции взора, так и системы формирования изображения.

Рассмотрим возможность организации gaze contingent исследования на базе айтрекера SMI Hi-Speed. При частоте регистрации 1250 Гц латентность системы составляет около 1 мс, при частоте регистрации 500 Гц – 2 мс. На латентность системы формирования изображения влияют два фактора: время формирования изображения и время его вывода на экран монитора. Типичное время формирования полного кадра 1280×1024 при глубине цвета 32 bpp на современных компьютерах составляет 2–6 мс и определяется в первую очередь пропускной способностью шины данных. Время вывода определяется параметрами монитора. Так, например, для ЭЛТ-монитора View Sonic 90 Gf при разрешении 800×600 и частоте кадровой развертки 144 Гц (предельные параметры) время вывода изображения составит 7 мс. Рекордными по частоте кадровой развертки (200 Гц) являлись ЭЛТ-мониторы Iiyama, для которых время вывода составляет 5 мс. Для массовых ЖК-мониторов частота развертки составляет 60 Гц, что обеспечивает время вывода кадра 16,6 мс. Для ЖК-мониторов с частотой развертки 120 Гц время вывода кадра сокращается до 8,3 мс.

Таким образом, используя для предъявления стимульного материала массовое оборудование, можно за приемлемое время выполнять динамическую коррекцию изображения, рассматриваемого наблюдателем в ходе фиксации, когда взор наблюдателя относительно неподвижен. Предъявление изображения в позицию взора во время саккады представляет собой значительно более сложную задачу, поскольку за время вывода изображения взор наблюдателя может переместиться на значительное расстояние от позиции вывода. Возможное решение проблемы состоит в выполнении упреждающего вывода изображения в позицию, которой взор еще только должен достичь. По завершении эксперимента выполняется отбор проб, в которых экспозиция во время саккады была выполнена в нужное время. В таком случае стратегия эксперимента приближается к схеме физических исследований на ускорителях элементарных частиц, когда из большого массива событий, зарегистрированных в ходе работы установки, отбираются те, которые удовлетворяют указанным экспериментатором условиям. Следует, однако, отметить, что подобная модификация схемы психологического эксперимента может привести к радикальному изменению воспринимаемой испытуемым ситуации и значительно повлиять на получаемый результат.

Выполнение низколатентного вывода в текущую позицию взора наблюдателя можно было выполнить с помощью полностью аппаратной схемы, в которой вывод предварительно подготовленного изображения выполняется в заданную зону жидкокристаллического экрана, не затрагивая остальных областей. При подобной организации эксперимента необходимая латентность вывода сокращается пропорционально площади изображения. Так, например, если имеющаяся система вывода позволяет экспонировать на современный жидкокристаллический экран изображения размером 1920×1080 точек за 16,6 мс, можно ожидать, что вывод предварительно подготовленного изображения 960×540 потребует 4,2 мс, а изображения 480×270 – 2,1 мс. В последнем случае фактическое время вывода будет в первую очередь определяться временем отклика матрицы экрана. Создание подобного устройства представляет собой перспективное направление исследований в парадигме gaze contingent.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Специфика айтрекинга состоит в том, что обработка данных выполняется в несколько этапов, а получаемый на каждом этапе результат существенно зависит от используемого способа обработки и значений настроечных параметров.

Исходные данные, получаемые в ходе видеорегистрации движений глаз, представляют собой изображения глаз наблюдателя, на которых определяются позиции зрачка и роговичного блика. Далее выполняется переход к координатам взора, привязанным к поверхности рассматриваемого изображения. Следует отметить, что первичная обработка данных может являться источником искажений, специфичных для конкретного типа установки и ее настроечных параметров. Результатом первого этапа является последовательность координат позиций взора в фиксированные моменты времени, дискретность которых определяется частотой регистрации установки («сырые данные»). На втором этапе выполняется детекция фиксаций (дрейфов, прерываемых микро-саккадами) и саккад. Необходимо иметь в виду, что «фиксации» и «саккады», выделенные программным обеспечением, являются результатом применения к «сырым данным» того или иного алгоритма обработки с конкретными параметрами детекции. Полученные результаты будут существенно зависеть от выбранного способа обработки. Для верификации корректности выбранного способа детекции фиксаций и саккад можно рекомендовать построение временной развертки движений глаз с нанесенными интервалами, соответствующими выделенным фиксациям. На третьем этапе исследователь, основываясь на имеющихся теоретических представлениях, гипотезах и структуре исследования, осуществляет отбор и вычисление конкретных показателей окуломоторной активности.

Первичная обработка данных

Изображение, поступающее с видеокамеры, регистрирующей движения глаз, может быть подвергнуто предварительной фильтрации с целью устранения шумов. Для такой фильтрации можно использовать, в частности, *билатеральный фильтр* – дальнейшее развитие сглаживающего гауссова фильтра. В отличие от классического гауссова фильтра, при билатеральной фиксации сглаживанию подвергаются только изменения яркости, не превышающие заданного порога. Таким образом, сглаживается «шум» на однородных участках изображения и при этом остаются не сглаженными резкие границы яркости (между изображениями зрачком и роговичного блика; между изображением зрачка и радужки). Следует отметить, что для систем обработки видеоизображений известны и более эффективные шумоподавляющие фильтры, но информация об их применении в системах видеорегистрации движений глаз отсутствует.

Следующий этап обработки данных – определение на видеоизображении координат центра зрачка и роговичного блика и расчет на их основании координат взора наблюдателя, привязанных к устройству визуализации, на котором выполнялась процедура калибровки.

Координаты взора наблюдателя могут быть подвергнуты дальнейшей фильтрации с целью сглаживания «шума». Возможным решением данной задачи является использование логических фильтров, основанных на шаблонах (*template-matching*). При таком способе фильтрации одиночный «выброс» в последовательности данных, не соответствующий общему тренду (стабильное положение взора во время фиксации либо монотонное изменение направления взора во время саккады) считается «шумом» и сглаживается. Поскольку решения о сглаживании принимаются на основании характера предшествующих и последующих данных, такую фильтрацию целесообразно выполнять в ходе обработки имеющихся данных, а не непосредственно на этапе регистрации. Поскольку фильтрация приводит к нивелированию внутренней структуры фиксаций и саккад, исследователь должен осознанно принимать решение об ее использовании, исходя из специфики проводимого исследования.

При создании управляемых взором компьютерных интерфейсов сглаживание выполняется только на основе предшествующих данных, что обеспечивает низкую латентность обработки. Объем анализируемых предшествующих данных может сокращаться непосредственно после саккады и увеличиваться во время фиксации. В этом случае применение фильтров полностью оправдано,

так как направлено на повышение удобства работы с компьютерным интерфейсом.

Дифференциация фиксаций и саккад

Первичные данные, содержащие координаты взгляда наблюдателя с дискретностью, определяемой частотой работы регистрирующего устройства (от 30 до 2000 Гц), как правило, подвергаются дальнейшей обработке с целью выделения последовательности фиксаций и саккад. При выполнении данного этапа необходимо помнить, что получаемый результат существенно зависит от используемого способа детекции и значений параметров настройки. Отсутствие в публикациях информации об использованном способе детекции делает невозможным корректное воспроизведение полученных исследователем результатов.

Наибольшее распространение получил алгоритм детекции, основанный на пороговой дисперсии (Dispersion Threshold Identification, I-DT), применяемый, как правило, при обработке данных, записанных с низкой частотой. Алгоритм имеет два настроечных параметра: минимальную продолжительность фиксации и пороговую дисперсию. Фиксациями считаются фрагменты данных, продолжительность которых не меньше минимальной заданной, а дисперсия не больше максимального порога. Остальные данные относятся к саккадам. При относительно малом значении пороговой дисперсии выделение фиксаций алгоритмом I-DT оказывается практически невозможным. При увеличении значения пороговой дисперсии число выделенных фиксаций сначала возрастает, а затем начинает сокращаться, так как соседние фиксации сливаются в одну большую. Типичные значения параметров детекции: порог дисперсии – 20–30 пикселей (0,5–0,8°), минимальная продолжительность фиксации – 50 мс.

Близким по принципу работы к алгоритму I-DT является алгоритм, основанный на построении минимального остонового дерева (Minimum Spanning Trees Identification, I-MST), т. е. для набора вершин графа строится связанный подграф минимально возможной длины (используя алгоритм Дейкстры – Прима или алгоритм Краскала). Саккадам в остоновом дереве будут соответствовать ребра, длина которых превышает заданный порог. Фрагменты дерева, не разделенные саккадами, рассматриваются как фиксации. Недостатком I-MST является то, что он игнорирует информацию о фактическом порядке следования данных.

Алгоритм, основанный на пороговой скорости (Velocity Threshold Identification, I-VT) используется, как правило, при обработке

данных, записанных с высокой частотой регистрации (500 Гц и более). Для каждых двух соседних точек данных рассчитывается мгновенная угловая скорость. Участки данных, для которых мгновенная скорость превышает заданный порог, рассматриваются как саккады, остальные участки – как фиксации. Более сложный вариант алгоритма предполагает также расчет мгновенного ускорения, в таком случае к саккадам относятся участки данных, для которых как скорость, так и ускорение превышают пороговые значения. Недостатком такой реализации является порождение сверхкоротких артефактных фиксаций, связанных с частичной окклюзией зрачка. С целью повышения надежности алгоритма вводится третий управляющий параметр: минимальная допустимая продолжительность фиксаций.

Алгоритм, использующий скрытую модель Маркова (Hidden Markov Model Identification, I-HMM), также основывается на данных о мгновенной скорости. Каждая точка данных классифицируется как относящаяся к саккаде или фиксации на основании вероятностной марковской модели с двумя состояниями (фиксация и саккада). Модель имеет 8 настроечных параметров: средние значения и стандартные отклонения мгновенных скоростей для фиксаций и саккад, вероятность остаться в каждом из двух состояний и вероятность перехода из текущего состояния в альтернативное. Вместо явного задания параметров возможно обучение модели на наборе тренировочных данных, для которого выполнена предварительная разметка саккад и фиксаций.

Детекция саккад также может быть выполнена с помощью фильтра Калмана (Kalman Filter Identification, I-KF). Фильтр Калмана представляет глаз как систему, имеющую две характеристики: положение и скорость. На основании данных о положении глаз фильтр предсказывает скорость. Предсказанная скорость сопоставляется с фактической, вычисленной на основе эмпирических данных. Интервалы, для которых фактическая скорость значительно отличается от предсказанной (по критерию χ^2) рассматриваются как саккады.

Отличительной особенностью всех описанных алгоритмов является фиксированная настройка параметров детекции. Маркусом Нистромом и Кеннетом Холмквистом предложен *адаптивный алгоритм*, в котором параметры детекции выбираются исходя из специфики обрабатываемых данных. Помимо собственно фиксаций и саккад, данный алгоритм выделяет как отдельный класс конечные корректировочные участки саккад, по авторской терминологии – глissады (glissade).

Обработка данных начинается с их фильтрации с помощью полиномиального сглаживающего фильтра, реализованного в Math-

Lab функцией `sgolay`. Для сглаженных данных вычисляется мгновенная скорость и ускорение на каждом интервале. При этом дополнительно отбрасываются некорректные данные (нулевые координаты взора, нулевой диаметр зрачка, скорость свыше $1000^\circ/\text{с}$, ускорение больше $100000^\circ/\text{с}^2$). Далее алгоритм выполняет итеративную оценку пороговой угловой скорости, используемой при детекции саккад. Начальное значение пороговой скорости устанавливается в диапазоне $100\text{--}300^\circ/\text{с}$. По всем интервалам данных, для которых скорость выше пороговой, вычисляются среднее значение скорости μ и стандартное отклонение σ . Новое значение пороговой скорости вычисляется как $\mu+6\sigma$. Алгоритм завершается, когда вновь вычисленное значение пороговой скорости отличается от предыдущего не более чем на 1%. По данным авторов, при чтении текстов средняя скорость составляет $5,44 \pm 4,55^\circ/\text{с}$ ($\mu \pm \sigma$), что дает пороговое значение $33^\circ/\text{с}$.

На следующем этапе выполняется выделение саккад. От каждого интервала данных, на котором скорость выше порогового значения, выполняется просмотр вперед и назад. Началом саккады считается первый интервал, на котором угловая скорость превышает значение $\mu+3\sigma$. Предельное значение угловой скорости, при котором оканчивается саккада, вычисляется как взвешенная комбинация начальной угловой скорости и факторов, характеризующих локальный уровень шума. При выделении саккад также учитывается их минимально допустимая продолжительность.

Алгоритм выделяет два типа глissад: высокоскоростные и низкоскоростные. Высокоскоростная глissада – конечный участок саккады, на котором скорость вновь достигает порогового значения $\mu+6\sigma$. Низкоскоростная глissада характеризуется возрастанием скорости выше пороговой конечной скорости.

В качестве фиксаций алгоритм выделяет участки данных, которые не являются шумом, саккадами или глissадами. Дополнительно используется критерий минимально допустимой продолжительности фиксаций. Для задачи чтения авторы указывают минимальную продолжительность фиксаций 40 мс.

После выделения фиксаций и саккад, выполняется анализ конкретных показателей окулоmotorной активности.

ПОКАЗАТЕЛИ ОКУЛОМОТОРНОЙ АКТИВНОСТИ

В практике научных исследований используются десятки показателей окуломоторной активности человека. Их выбор зависит от содержания конкретной задачи, решаемой экспериментатором, и возможностей имеющегося оборудования. Условно эти показатели можно разбить на четыре группы: а) связанные с непосредственным перемещением глаз, б) связанные с относительно устойчивым положением взора, в) численные (частотные) показатели, г) связанные с инерционностью движений. Рассмотрим их более подробно.

Показатели, связанные с непосредственным перемещением глаз

В данную группу показателей включаются метрики (направление, амплитуда, длительность, скорость, ускорение, траектория, распределение) саккад, прослеживающих, вергентных и др. движений глаз.

Амплитуда саккад. Под амплитудой саккад может пониматься как расстояние между начальной и конечной позициями, так и общая длина пути за время выполнения саккады. Амплитуда может измеряться в угловых градусах или в экранных пикселях. В ПО айтрекеров SR Research и SensoMotoric Instruments амплитуда саккад вычисляется как произведение средней скорости (v /с) за время саккады на продолжительность саккады. На низкоскоростных установках амплитуда саккад вычисляется как евклидова дистанция между фиксациями.

Эффективное использование данного показателя осложняется тем, что он подвержен значительным индивидуальным вариациям. Высокоамплитудные саккады ($> 15^\circ$) имеют низкую точность, по их завершении часто выполняется дополнительная низкоамплитудная корректирующая саккада. Последовательности корот-

ких саккад при рассматривании сцены связываются с детальным рассматриванием изображения. К сокращению амплитуды саккады может привести вспышка света в момент ее начала. На величину амплитуды может влиять размер стимула. Амплитуда саккад в случае рассматривания мысленно представленного изображения может как уменьшаться, так и возрасти. Амплитуды саккад левого и правого глаз незначительно различаются.

При рассматривании на компьютере полноэкранных фотоизображений преобладают короткоамплитудные (4°) саккады, т. е. новая фиксация выполняется в относительной близости от предыдущей. Высокоамплитудные саккады (до 20°), связанные с переходом к рассматриванию других областей изображения, относительно редки. При чтении типичная амплитуда саккад составляет 7–8 букв или около 2° .

В общем случае амплитуда саккад зависит от поставленной цели, используемого стимульного материала, сложности решаемой задачи.

Асимметрия распределения амплитуды саккад. Данный показатель характеризует преобладание в выборке высокоамплитудных или низкоамплитудных саккад. На величину асимметрии могут влиять, в частности, решаемая задача и размер экрана, на котором экспонируется изображение.

Метрика антисаккад связана с выполнением задания, в котором от наблюдателя требуется не смотреть на экспонируемую на периферии экрана отметку, а вместо этого перемещать взор в противоположном относительно центра экрана направлении. С решением данной задачи связываются следующие характеристики: латентность ошибочной саккады (в направлении отметки), амплитуда ошибочной саккады, время коррекции (начала саккады в противоположном направлении), конечная позиция взора, латентность антисаккады (саккады в противоположном направлении, которой не предшествовала ошибочная саккада), амплитуда антисаккады. Низкая эффективность решения задачи связывается со слабым произвольным контролем (выполняемым префронтальным отделом мозга).

Задача на антисаккады широко используется в медицинской диагностике, низкая эффективность ее решения связывается с психиатрическими и нейрофизиологическими заболеваниями, такими как дефицит внимания, болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, болезнь Хантингтона и др.

Наличие опережающих саккад, предшествующих выполнению наблюдателем действий, связанных с рассматриваемым изображением. Опережающие саккады могут, в частности, предшествовать

вербальному описанию рассматриваемого фрагмента изображения; действиям, связанным с навигацией в 3-мерной виртуальной среде и др. Выполнение опережающих саккад повышает точность последующих движений глаз, связанных с сопровождением объекта. Помимо направления саккад, аналогичным образом возможен анализ направления **глиссад** (конечных коррекционных участков саккад), **микросаккад**, **следающих движений**. Большинство глиссад при чтении выполняется в направлении, противоположном направлению прогрессивных саккад.

Направление траектории рассматривания изображений – генеральное направление последовательности фиксаций и саккад при рассматривании изображения. Поскольку направление рассматривания может меняться, иногда выделяют последовательности саккад, идущих в одном направлении. Другой способ оценки направления состоит в выделении зон интереса и расчете направления траектории рассматривания для каждой из них. Направление траектории связывается со стратегией поиска значимого объекта.

Амплитуда глиссад. Глиссады – конечные коррекционные участки саккад. Вычисление их амплитуды выполняется так же, как и для саккад. Корреляция между амплитудами саккад и глиссад отсутствует.

Амплитуда микросаккад. Амплитуда микросаккад вычисляется так же, как и для саккад. Пиковая угловая скорость микросаккад линейно зависит от амплитуды, так что данные по микросаккадам продолжают «главную последовательность». Величина амплитуды микросаккад зависит от освещенности: в темноте амплитуды плавного «сплыва» глаз и микросаккад выше, чем на свету, что может объясняться тем, что для коррекции «сплыва» необходимо обнаружить фовеальное смещение изображения. Амплитуда микросаккад снижается непосредственно после экспозиции нового изображения.

Длина траектории рассматривания изображений (scanpath length). Длина траектории может определяться как сумма амплитуд всех саккад, объединяемых в траекторию. При таком способе расчета не учитываются кривизна саккад и возможные искажения, вносимые используемыми алгоритмами детекции. При расчете длины траектории как суммы дистанций между соседними точками данных результат вычислений существенно зависит от временной разрешающей способности и стабильности работы регистрирующего оборудования. Использование разных методов вычисления может привести к значительным различиям в результатах.

Направление саккады. Измеряться может как абсолютное направление, в градусах в системе координат, связанной с экспони-

руемым изображением, так и относительное, по отношению к направлению предшествующей саккады.

Точность саккад. Определяется как отношение амплитуды первой саккады, выполненной в направлении объекта на расстояние до объекта. В случае криволинейной саккады и вычисления амплитуды саккады как длины кривой точное попадание может интерпретироваться как «перелет». Альтернативное определение – разность координат целевого объекта и конечной точки саккады. Показатель часто используется в нейрофизиологических исследованиях.

Продолжительность саккад. Определение продолжительности саккад связано со значительными техническими трудностями. Если начальный момент саккады определяется относительно просто, то определение момента окончания осложняется наличием конечных корректирующих участков (глиссад). Таким образом, продолжительность саккад будет значительно различаться в зависимости от того, будут ли глиссады учитываться в составе саккад. На продолжительность саккад влияют также моргания, происходящие одновременно с саккадами. Имеются данные, что моргания связаны с 20% саккад, причем продолжительность таких саккад возрастает в среднем на 36%.

Кумулятивная продолжительность саккад при рассмотрении изображения. Применение этого параметра основывается на предположении о подавлении визуальной стимуляции во время саккад. Отсюда следует, что при разработке интерфейса желательно увеличить эффективное время взаимодействия за счет сокращения суммарной продолжительности саккад оператора. Поскольку продолжительность саккад и их длина тесно связаны, на практике в одних и тех же целях можно использовать как суммарную продолжительность саккад, так и суммарную длину пути. Это измерение используется при изучении влияния человеческого фактора и в эргономике.

Кумулятивная продолжительность движения глаз по траектории. Анализируется траектория движений глаз, связанная с решением конкретной задачи, либо траектория движений глаз в процессе чтения фрагмента текста. Наибольшую сложность представляет однозначное определение точек начала и конца траектории. В исследованиях чтения продолжительность движений глаз связывается с обработкой отдельного предложения и текста в целом. Анализироваться может как продолжительность движения, связанного с регрессией, так и общая длина пути.

Скорость саккад. Средняя скорость вычисляется как амплитуда саккады, деленная на ее продолжительность. Пиковая скорость –

максимальная скорость, достигаемая во время саккады. Следует отметить, что получаемые значения скорости зависят от используемых алгоритмов сглаживания данных и последующей детекции событий. Максимальная пиковая скорость саккад может достигать $1000^\circ/\text{с}$; при чтении текста пиковая скорость возвратных саккад достигает $700^\circ/\text{с}$. Скорость саккад может трактоваться как показатель уровня когнитивной активации или уровня активности. Известен ряд факторов, влияющих на скорость саккад. В частности, антиципирующие саккады (в направлении еще не появившихся объектов) характеризуются меньшей скоростью, чем саккады при рассмотрении изображений. С увеличением сложности решаемой задачи скорость саккад возрастает. Саккады, выполняемые в фазе быстрого сна, имеют вдвое меньшую скорость, по сравнению с саккадами, выполняемыми во время бодрствования. Низкая скорость саккад может быть показателем наличия нейрофизиологических расстройств или связана с приемом медикаментов и алкоголя.

Скорость следящих (прослеживающих) движений. В нормальных условиях пиковая скорость следящих движений не превышает $25\text{--}40^\circ/\text{с}$. У профессиональных игроков в бейсбол скорость следящих движений может достигать $130^\circ/\text{с}$. При слежении за объектом, движущимся по криволинейной траектории, скорость следящих движений ниже, чем при слежении за объектом, движущимся по прямолинейной траектории. У пожилых людей скорость следящих движений снижается; новорожденные дети испытывают затруднения при слежении за целью, движущейся со скоростью $25^\circ/\text{с}$. Низкая скорость следящих движений может быть связана с наличием нейрофизиологических расстройств и приемом медикаментов.

Средняя скорость перемещения взгляда по траектории. Показатель используется в случае регистрации данных с помощью низкоскоростной системы, не позволяющей точно определять скорости отдельных саккад. Рассчитывается как произведение средней амплитуды саккад (в градусах) к частоте саккад (в $1/\text{с}$). При изучении чтения скорость перемещения взгляда может вычисляться, как произведение скорости чтения (в символах в секунду) и размера отдельного символа (в градусах).

Ускорение саккад. Величина ускорения иногда используется как дополнительный параметр в алгоритмах детекции саккад; в частности, по максимальной величине ускорения можно отличать следящие движения от саккад. Пиковая величина ускорения во время саккад может достигать $100000^\circ/\text{с}^2$; типичные пиковые значения составляют $6000\text{--}12000^\circ/\text{с}^2$. Экстремально высокие значения ускорения могут свидетельствовать о наличии артефактов в данных.

Величина ускорения возрастает с амплитудой саккады. Анализ динамики ускорений при выполнении саккад представляет интерес при изучении нейрофизиологических механизмов движений глаз.

Асимметрия саккад. Показатель характеризует соотношение продолжительности фаз ускорения и торможения во время саккады.

Кривизна саккад. Показатель характеризует пространственную форму саккад. В простейшем случае вычисляется как угловое отклонение от направления саккады. На величину кривизны может влиять: направление саккад (при наклонных саккадах кривизна больше, чем при вертикальных и горизонтальных); нерелевантные дистракторы, располагающиеся рядом с конечной позицией саккады; инструкции испытуемым.

Кривизна глоссид вычисляется аналогично кривизне саккад. По известным данным, кривизна глоссид больше, чем кривизна саккад, авторы объясняют данный результат недостаточной степенью контроля на конечных участках саккад и, следовательно, их большей вариабельностью.

Отношение числа локальных и глобальных саккад. Для вычисления устанавливается пороговая амплитуда саккад. Саккады с амплитудой выше пороговой считаются глобальными, остальные – локальными. Показатель может использоваться для установления различий между новичками и экспертами в различных видах деятельности.

Показатели, связанные с устойчивым положением взора

К данной группе относятся характеристики отдельных фиксаций, групп фиксаций и обобщенной структуры распределения взора при рассматривании изображения; в их число входят: продолжительность рассматривания, различные меры разброса позиций фиксаций, интегральные показатели сходства/различия паттернов рассматривания.

Положение взора. Как правило, задается X и Y координатами относительно левого верхнего угла экрана, на котором экспонируются изображения. Может представляться: исходными данными, непосредственно получаемыми с регистрирующей системы, координатами фиксаций (зависят от используемого алгоритма детекции событий), принадлежностью к заданной зоне интереса (зависит от способа разметки зон интереса). Может быть связано с решением следующих задач: локализация объектов, координация движений, планирование манипуляций с несколькими объектами, проверка

достижения необходимого результата. Следует, однако, учитывать, что локализация взора на целевом объекте не всегда означает полное понимание связанной с ним информации.

Относительная начальная позиция внутри зоны интереса. Показатель используется в основном при изучении процессов чтения. При этом выполняется естественная разбивка текста на зоны интереса – отдельные слова. Считается, что оптимальная позиция взора находится левее центра читаемого слова. Начальная позиция внутри следующего слова зависит от позиции внутри предыдущего слова. При рассматривании контурного объекта начальная позиция, как правило, располагается вблизи его «центра тяжести».

Разброс позиций взора. При учете разброса позиций в ходе рассматривания изображения (анализу подвергаются исходные данные либо координаты фиксаций) изучаются, как правило, межсубъектные различия в способе рассматривания. Разброс позиций взора в рамках отдельных фиксаций может быть связан как с индивидуальными особенностями наблюдателей, так и со спецификой регистрирующей аппаратуры и используемых алгоритмов детекции событий.

Диапазон позиций. Диапазон представляет собой дистанции между максимально отклоняющимися точками по горизонтали и вертикали: $R_h = \max(x) - \min(x)$, $R_v = \max(y) - \min(y)$.

Показатель весьма чувствителен к наличию «выбросов» в наборе данных. Пример использования – изучение движений глаз у водителей; в нормальных условиях величина саккад может составлять до 82° по вертикали и до 24° по горизонтали. Сокращение протяженности саккад является признаком «туннельного зрения», приводящего к снижению безопасности вождения.

Вектор смещения фиксаций. Среднее направление смещения фиксаций относительно центральной точки. Вычисляется как суммарное смещение фиксаций относительно центра с учетом их продолжительности. Показатель был введен при изучении распределения фиксаций водителей во время вождения. Считается, что величина вектора смещения характеризует зрительную нагрузку.

Площадь, покрываемая картой распределения внимания. Для вычисления покрываемой площади после построения «тепловой карты» устанавливается предельный «уровень отсечки» значений плотности вероятности пребывания взора, после чего вычисляется суммарная площадь ячеек карты, для которых плотность вероятности выше пороговой. Показатель чувствителен к параметрам построения тепловой карты и выбору «уровня отсечки»; используется для характеристики неоднородности распределения позиций фиксаций.

Расстояние между позициями взора. Евклидово расстояние между двумя точками вычисляется по формуле $d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$, где (x_1, y_1) и (x_2, y_2) – координаты двух точек.

Сходство последовательностей «тепловых карт». Карты распределения внимания, или «тепловые карты» (heat map) представляют собой визуализацию плотности распределения направления взора по поверхности изображения.

Для разных «тепловых карт», определенных на одной координатной сетке, можно ввести «метрику сходства» и таким образом численно оценить величину сходства тепловых карт, соответствующих разным временным интервалам рассматривания изображения, разным наблюдателям, разным изображениям и т. д. При этом сопоставлению подвергаются разные статические распределения плотности вероятности направления взора, а информация о динамике рассматривания изображения теряется.

Дистанция «редактирования строки». Последовательность рассматривания выделенных зон изображения представляется как коды соответствующих областей интереса. Зоны интереса могут выделяться либо как ячейки квадратной сетки, либо как области изображения, несущие определенную семантическую нагрузку. Мерой сходства таких последовательностей принимается минимальное число операций вставки, удаления и замены, которые необходимо выполнить, чтобы преобразовать одну последовательность в другую.

Использование дистанции для строк, кодирующих зоны интереса, дает на практике релевантные результаты при выполнении ряда условий: равной семантической значимости выделенных зон интереса, равных площадей зон интереса, четкого пространственного разделения зон интереса (отсутствие общих границ).

Сопоставление последовательностей саккад и фиксаций. Последовательность фиксаций и саккад представляется как набор векторов. Для каждой пары векторов из первой и второй последовательностей вычисляется расстояние между ними. Далее находится такое соответствие, при котором суммарная дистанция между парами векторов будет минимальной. Величина сходства рассчитывается с учетом пяти нормализованных показателей: различия в амплитуде, различия в начальной позиции, различия в направлении векторов, различия в продолжительности фиксаций, различия в длине последовательностей.

Различия в картах распределения внимания. Различия между двумя картами распределения внимания, построенными для наборов данных A и B , могут быть представлены в виде простого вычитания одной карты из другой: $AM_{diff} = AM_A - AM_B$.

В таком случае итоговая карта будет содержать как положительные, так и отрицательные значения. Для того чтобы получить карту различий, содержащую только положительные значения, разность берется по модулю: $AM_{diff} = |AM_A - AM_B|$.

Также для вычисления различий могут быть использована квадратичная ошибка: $AM_{SE} = (AM_A - AM_B)^2$.

Угол между векторами, соответствующими распределением продолжительности рассматривания зон интереса. Пусть для двух наборов фиксации A и B , соответствующих рассматриванию одного и того же изображения, задан набор зон интереса. Тогда для каждой зоны интереса можно определить общую продолжительность ее рассматривания, что даст два вектора $v_1 = (D_{A1}, D_{A2}, \dots, D_{An})$ и $v_2 = (D_{B1}, D_{B2}, \dots, D_{Bn})$, где n – число выделенных зон интереса. В случае если относительная продолжительность рассматривания зон интереса для обоих наборов одинакова, вектора в n -мерном пространстве будут иметь одно и то же направление (хотя, возможно, и разную длину). Численно мера сходства вычисляется как косинус угла между векторами, равный нормированной величине скалярного произведения векторов:

$$\cos \theta = \frac{v_1 v_2}{\|v_1\| \|v_2\|}$$

Коэффициент корреляции между картами распределения внимания. В качестве показателя величины сходства между двумя картами распределения внимания можно использовать коэффициент корреляции Пирсона между соответствующими наборами значений плотности распределения внимания:

$$r = \frac{\sum_{x,y} (AM_1(x,y) - AM_{1avg})(AM_2(x,y) - AM_{2avg})}{\sqrt{\sum_{x,y} (AM_1(x,y) - AM_{1avg})^2 \sum_{x,y} (AM_2(x,y) - AM_{2avg})^2}},$$

где $AM_1(x, y)$, $AM_2(x, y)$ – значения плотности распределения внимания в узлах сетки для первой и второй карт распределения внимания, AM_{1avg} , AM_{2avg} – средние значения плотности распределения внимания.

Интервал между микросаккадами. Внутри отдельных фиксаций выделяются микросаккады; данный показатель характеризует продолжительность стабильных фрагментов фиксаций между ними. Его использование возможно при высокой разрешающей способности регистрирующей системы; получаемые результаты существенно зависят от используемых способов обработки.

Продолжительность фиксаций. Наиболее часто используемый показатель в айтрекингových исследованиях. Частота обращений к нему связана в первую очередь с представлениями о том, что переработка визуальной информации выполняется только во время фиксаций и подавляется во время саккад. Предполагается, что более продолжительные фиксации (в другой терминологии – межсаккадические интервалы) связаны с более сложными уровнями переработки информации. В частности, более продолжительные фиксации могут быть связаны: с чтением редко употребляемых слов и сложных грамматических структур; с рассматриванием объектов, не соответствующих контексту сцены; с выполнением сложных мысленных задач; с более высоким уровнем подготовки специалиста.

Сокращение продолжительности фиксаций может быть связано с более сложной окружающей обстановкой (например, при вождении автомобиля); с высоким уровнем стресса; с рассматриванием знакомых объектов.

При использовании показателей, связанных с положением и продолжительностью фиксаций, следует иметь в виду, что значительная доля зрительной информации может эффективно восприниматься периферическим зрением. Следует понимать, что продолжительность фиксаций, выделяемых в ходе математической обработки исходных данных, существенно зависит от используемого алгоритма детекции и его настроечных параметров.

Асимметрия распределения продолжительности фиксаций. Параметр показывает, какие фиксации преобладают в анализируемой выборке: короткие или более продолжительные. Может использоваться как интегральный показатель особенностей переработки информации при сопоставлении различных условий работы оператора.

Продолжительность первой фиксации. Выделение первой фиксации после экспозиции целевого изображения связано с определенными теоретическими трудностями. Предположим, наблюдатель смотрит в определенную точку экрана в тот момент, когда появляется целевое изображение. После этого позиция взгляда еще некоторое время остается неизменной. Следует ли в таком случае данный фрагмент записи считать первой фиксацией и если да, то какова ее продолжительность: от начала экспозиции изображения до смены направления взгляда или же от того момента, когда взгляд наблюдателя попал в позицию фиксации еще при экспозиции предыдущего изображения?

В случае относительно продолжительного времени экспозиции такую «первую фиксацию» можно исключить из анализа, не теряя при этом существенной части экспериментальных данных.

Продолжительность первой фиксации в выделенной зоне интереса. Применяется в случае выделения нескольких пространственно разнесенных зон интереса, так что первая фиксация в каждой из них может быть связана с рассмотрением определенной части изображения.

При изучении процесса чтения первая фиксация на слове связывается с лексической активацией; ее продолжительность может зависеть от знакомости слова, его морфологической сложности, наличия метафор, орфографических особенностей, наличия многозначности и других лингвистических факторов. Продолжительность последующих фиксаций длинного слова зависит от продолжительности первой фиксации. В случае короткой первой фиксации последующие будут более длинными. В случае длинной – более короткими.

При рассмотрении сложной сцены продолжительность первой фиксации может увеличиваться, если исследование выполняется с использованием gaze contingent технологии и условия рассмотрения намеренно ухудшены. Это дает основания считать продолжительность первой фиксации мерой полученной визуальной информации. При рассмотрении сложных сцен продолжительность первой фиксации на семантически несогласованных и маловероятных (т. е. более информативных) участках изображения была выше, чем для более правдоподобных участков. В этом случае продолжительность первой фиксации можно рассматривать как меру целостной интеграции сцены.

Время непрерывного рассматривания зоны интереса. Показатель характеризует время непрерывного рассматривания выделенной зоны интереса. Вычисляется как суммарная продолжительность последовательности фиксаций в данной зоне или как суммарная продолжительность последовательности первичных данных. Продолжительность непрерывного рассматривания связана с семантикой рассматриваемой зоны интереса и поставленной перед наблюдателем задачей. Дольше рассматриваются зоны, содержащие высокоинформативные объекты или объекты, изменяющиеся в ходе экспозиции. Также высокая продолжительность рассматривания отдельных зон интереса может быть связана с отсутствием опыта в решении поставленной задачи и затруднениями в переработке получаемой информации. При чтении суммарное время рассматривания отдельного слова связано с медленно протекающими когнитивными процессами. При решении задачи выбора наиболее привлекательного объекта наиболее продолжительное время рассматривается тот объект, который в итоге будет выбран.

При создании управляемых взором компьютерных интерфейсов продолжительное непрерывное рассматривание целевой зоны (400–500 мс) является маркером активации соответствующего элемента интерфейса.

Суммарное время рассматривания зоны интереса. Показатель рассчитывается как суммарная продолжительность всех фиксаций в выделенной зоне интереса в ходе экспозиции изображения или как суммарная продолжительность первичных данных.

Продолжительность первого непрерывного рассматривания зоны интереса. С первым просмотром выделенной зоны интереса связывается распознавание объектов и первоначальная лексическая обработка текста. Продолжительность первоначального рассматривания выше для зон интереса, содержащих семантически более информативные объекты. Следует отметить, что отсутствует единая точка зрения относительно того, какой из показателей более информативен: суммарная продолжительность рассматривания или продолжительность первого рассматривания.

Численные (частотные) показатели

В данную группу входят показатели, характеризующие число различных элементов окуломоторной активности: фиксаций, саккад, морганий, следящих движений и т. д. Подсчет проводится либо в течение полного времени рассматривания, либо за единицу времени; в последнем случае говорят о частоте соответствующих событий.

Число саккад. При использовании данного показателя следует понимать, что число выделенных саккад зависит от используемого алгоритма детекции. При отсутствии следящих движений число саккад при рассматривании изображения будет равно числу фиксаций ± 1 . При сопоставлении разных показателей следует учитывать, что увеличение числа саккад в течение заданного временного интервала эквивалентно уменьшению средней продолжительности фиксаций. При слежении за движущимся объектом саккады выполняются при необходимости «догнать» быстро движущуюся цель. В ходе анализа могут отбираться саккады, удовлетворяющие заданным условиям: сакакады в направлении целевого объекта; имеющие заданное угловое направление (например, вертикальное или горизонтальное); заданную амплитуду, латентность и т. д.

Абсолютное число саккад вычисляется либо для постоянной дистанции (например, строки текста), либо на фиксированном временном интервале (как правило, равном времени экспозиции рассматриваемого изображения). Отдельно может быть подсчита-

но количество саккад определенного типа, например регрессивных саккад при чтении текста. Доля саккад может быть вычислена как отношение числа саккад в подгруппе (удовлетворяющих определенным условиям) к общему числу саккад. Частота саккад определяется как число саккад в единицу времени.

Уменьшение частоты саккад может быть связано с увеличением нагрузки на память и увеличением уровня возбуждения. Решение задачи, связанной с подробным рассматриванием изображения слева направо и сверху вниз, напротив, приводит к увеличению частоты саккад. При выполнении задачи слежения за движущимся объектом увеличение частоты саккад может быть показателем наличия психиатрических и нейрофизиологических расстройств.

Саккады, завершающиеся глиссадами. Глиссады – конечные участки саккад, во время которых выполняется корректировка направления взора в направлении, противоположном направлению саккады. В нормальных условиях глиссадами завершается от 20 до 50% саккад, причем при чтении доля высокоамплитудных саккад, завершающихся глиссадами, выше, чем при рассматривании изображения. Увеличение доли глиссад может быть также связано со снижением уровня готовности оператора.

Частота микросаккад. Микросаккады – резкие изменения направления взора внутри фиксации. Как правило, рассчитывается число микросаккад в секунду; типичные показатели – 0,2–3 микросаккады/секунду. В первые 150 мс экспозиции предьявленного для рассматривания изображения частота микросаккад минимальна, максимум достигается через 300 мс после начала экспозиции.

Частота интрузий. Интрузия – произвольное резкое смещение направления взора в сторону от целевого изображения, а затем возврат обратно. Типичная амплитуда интрузий – 0,5–5°, продолжительность – 200–400 мс. Частота интрузий у здоровых наблюдателей может составлять 1–40 в минуту, среднее значение – 10 в минуту. Увеличение частоты интрузий может быть связано с рядом заболеваний, пожилым возрастом, употреблением табака, алкоголя и медикаментов. Уменьшение частоты интрузий может быть связано с решением задач на припоминание положения объектов; слежением за движущимся объектом; выполнением задач, требующих быстрого перемещения взора.

Частота следящих движений. При наблюдении за быстро движущимся объектом плавные следящие движения могут прерываться догоняющими саккадами в направлении цели. Таким образом, при описании следящих движений можно использовать число фрагментов следящих движений в секунду или эквивалентный

показатель – число догоняющих саккад в секунду. Данный показатель используется относительно редко, что связано с отсутствием общепринятых алгоритмов детекции следящих движений. Частота следящих движений возрастает с возрастанием скорости движения цели.

Число фиксаций. Число фиксаций в выделенной области интереса за заданное время (в простейшем случае – в течение полного времени экспозиции) – широко используемый показатель. При его использовании необходимо понимать, что число выделенных фиксаций зависит от используемого исследователем алгоритма детекции событий и параметров его работы. Следует также учитывать, что число фиксаций зависит от времени рассматривания и площади выделенной зоны интереса.

Увеличение числа фиксаций может быть связано с рядом когнитивных аспектов. Большее число фиксаций приходится на области изображения с высокой семантической значимостью. Возрастание сложности поисковой задачи приводит к увеличению числа фиксаций. Экспертам для решения задачи требуется меньшее число фиксаций, чем наблюдателям, не обладающим необходимым опытом. Первоначальная локализация объектов в пространстве требует большего числа фиксаций, чем повторная. При чтении число фиксаций на отдельном слове зависит от его морфологической сложности, частоты употребления и знакомости читателю. Увеличение числа фиксаций с одновременным сокращением их продолжительности характерно для ряда психиатрических и нейрофизиологических заболеваний. Использование бифокальных очков связано с выбором оптимального направления взгляда, позволяющего использовать нужную зону очков, что приводит к увеличению числа фиксаций.

Малое число последовательных фиксаций в выделенной зоне интереса и частые переходы от одной зоны интереса к другой в задачах поиска и сравнения объектов могут быть интерпретированы как свидетельство использования наблюдателем стратегии, обеспечивающей минимальную нагрузку на память.

Отношение числа фиксаций. Отношение числа фиксаций может вычисляться путем сопоставления числа фиксаций в выделенных зонах интереса или между разными экспериментальными группами. Возможно вычисление доли фиксаций, относящихся к объектам заданного класса (области определенного цвета, релевантные поля на шахматной доске, критическая область интерфейса и т. д.). Разделение фиксаций на группы также может быть выполнено на основании свойств самих фиксаций: их продолжи-

тельности; дистанции между фиксациями, выполненными левым и правым глазом, функциональному назначению фиксаций.

Частота фиксаций. Частота фиксаций определяется как число фиксаций за заданное время. Ее величина примерно обратно пропорциональна средней продолжительности фиксаций, однако используемый способ вычисления приводит к тому, что в данный показатель оказываются неявно включены также продолжительность саккад, морганий и следящих движений. Частота фиксаций используется при изучении чтения, влияния человеческого фактора, в юзабилити исследованиях. При увеличении сложности задачи частота фиксаций снижается. При выполнении авиационных маневров частота фиксаций возрастает по сравнению с прямолинейным полетом. При изучении процессов чтения частота фиксаций связывается со скоростью чтения.

Число взглядов. Под взглядом понимается непрерывное рассматривание выделенной зоны интереса. В одном взгляде может содержаться несколько последовательных фиксаций. Иногда дополнительно оговаривается, что взгляды возможно выделять только для зон интереса, не имеющих общих границ. Число взглядов – популярный показатель в исследованиях, связанных с ролью человеческого фактора и вождением автомобилей.

Увеличение числа взглядов может интерпретироваться как показатель семантической информативности выделенной зоны интереса и сложности интерфейса. Среднее число взглядов, необходимых для опознания объекта, снижается с увеличением опыта наблюдателя. При использовании симуляторов число взглядов на панель управления автомобиля меньше, чем при вождении реального автомобиля.

Отношение числа взглядов. Вычисляется отношение числа взглядов наблюдателя, приходящихся на разные зоны интереса или отношение числа взглядов на одну зону интереса для разных экспериментальных групп.

Частота взглядов. Показатель определяется как число взглядов на выделенную зону интереса за минуту. Может использоваться при изучении социальной коммуникации без применения айтрекеров. В айтрекинговых исследованиях применяется относительно редко. При изучении качества выполняемой деятельности частота взглядов оператора интерпретируется как показатель важности выделенной зоны интереса.

Отношение числа наблюдателей смотревших/не смотревших в заданную зону интереса. Простейшим примером использования данного показателя может быть вычисление доли наблюдателей,

смотревших на логотип фирмы при показе рекламы. Показатель можно интерпретировать как способность целевого объекта привлекать внимание наблюдателей. Наиболее часто используется при изучении процессов чтения. При чтении часто пропускаются высокочастотные слова, короткие слова и слова, ожидаемые исходя из контекста.

Доля областей интереса, на которые смотрел наблюдатель. Примером использования показателя является изучение особенностей вождения автомобилей. Водителям показывались видео опасных ситуаций. Затем вычислялась доля потенциально опасных объектов (пешеходы, велосипедисты, мамы с колясками и т. д.), на которые смотрели водители. При интерпретации показателя следует учитывать, что фовеальное рассматривание объекта не является необходимым условием его опознания.

Частота переходов между зонами интереса. В простейшем случае частота переходов может вычисляться для пары выделенных зон интереса. Поскольку при анализе может быть выделено более чем две зоны интереса, для каждой пары зон интереса частота переходов вычисляется отдельно. В таком случае вводится матрица переходов, значения элементов которой соответствуют частотам переходов между выделенными зонами интереса. Также может вычисляться средняя частота переходов между всеми выделенными зонами интереса для разных групп участников или экспериментальных условий. Частота переходов может интерпретироваться как показатель объема рабочей памяти, а также как показатель величины интеграции между материалом разных модальностей (графическим и текстовым).

Число и частота регрессий. Регрессивные движения внутри слов рассматриваются как показатель лексической активации (понимания слова), регрессивные движения между словами связываются с процессом построения предложения (выстраивания взаимного отношения слов). При чтении текстов, содержащих более одного предложения, могут наблюдаться регрессии на границах предложений.

Увеличение числа регрессий может быть связано с искусственным введением в текст грамматических ошибок, сформированностью навыков чтения, различными заболеваниями. В ходе формирования навыков чтения в начальной школе число регрессий снижается и достигает минимума у студентов старших курсов. В дальнейшем число регрессий с возрастом начинает вновь возрастать.

Как отдельный класс рассматриваются возвраты – специфические регрессии, совершаемые в ту же позицию, из которой перед этим было выполнено движение в прямом направлении. Число

возвратов может использоваться как один из показателей сложности интерфейса.

Показатели, связанные с инерционностью движений

При измерении инерционных показателей окулomotorной активности необходимо учитывать, что регистрирующее оборудование имеет собственную инерционность, определяемую спецификой работы аппаратуры и программного обеспечения. Для устранения дополнительных задержек сигнал об изменении целевого изображения должен формироваться аппаратно на основании оптического маркера, выводимого на экран одновременно с целевым изображением. В таком случае фактическое запаздывание регистрирующей системы будет определяться только частотой регистрации движений глаз.

Латентность саккад. Латентность саккады – время реакции на экспонируемый стимул, определяется как временной интервал с момента появления целевого объекта до начала саккады в его направлении. Момент начала саккады характеризуется резким изменением скорости движения и благодаря этому может быть определен достаточно точно. Типичная латентность саккад наблюдателя, проинструктированного, как можно быстрее смотреть на периферически экспонируемую целевую метку, составляет 180–200 мс и более.

Существенное сокращение латентностей саккад может быть достигнуто в экспериментах, использующих прием «разъединения». В этом случае за экспозицией центральной фиксационной точки следует «пустой» временной интервал продолжительностью 200 мс, во время которого происходит так называемое «высвобождение внимания». Далее следует периферически экспонируемый целевой объект. При использовании данного приема может быть достигнута латентность саккад в 120–150 мс. Для сравнения, типичные латентности вызванных потенциалов начинаются с 150 мс, а минимальное время мануальной реакции – с 180 мс.

Латентности саккад имеют бимодальное распределение. Быстрые саккады, соответствующие первому пику распределения (латентность менее 100 мс), получили название «экспресс-саккад». При поражениях верхних бугров четверохолмия среднего мозга экспресс-саккады не наблюдаются, что позволяет сделать вывод об участии данной структуры мозга в генерации окулomotorного ответа.

Одновременная экспозиция целевого объекта и дистрактора приводит к увеличению латентностей на 20–40 мс, по сравнению с пробами, в которых дистрактор отсутствует. Если дистрактор начинает экспонироваться на 50–100 мс раньше, чем целевой объект,

латентности саккад сокращаются. В этом случае дистрактор действует как предупреждающий сигнал.

Увеличение латентностей саккад происходит в задачах «разделенного внимания», когда от наблюдателя требуется одновременно выполнять саккаду на объект, экспонируемый в одной половине зрительного поля, и нажимать кнопку при появлении объекта, показываемого в другой половине зрительного поля.

Сокращение латентностей саккад происходит в случае, если структура выполняемой задачи позволяет наблюдателю предсказывать направление и амплитуду предстоящей саккады.

При использовании классических точечных лабораторных стимулов латентности саккад выше, чем для естественных, встречающихся в повседневной жизни объектов.

Латентность следящих движений определяется как время реакции на появление плавно движущегося целевого объекта. Инициация следящих движений состоит из двух фаз. На первой (первые 100 мс) выполняется ускоряющееся движение в направлении цели. На второй фазе начинается непрерывная компенсирующая коррекция направления взора в соответствии с изменением положения движущегося объекта. Определение латентности следящих движений представляет большую сложность, чем определение латентности саккад, из-за плавного характера следящих движений. Характерная латентность следящих движений в случае, когда наблюдатель не может заранее предсказать направление и скорость объекта, составляет 100–200 мс. Если наблюдатель может предсказать появление целевого объекта, латентность следящих движений сокращается вплоть до отрицательных величин, т. е. движение глаз начинается до появления объекта.

Увеличение латентности следящих движений может наблюдаться, когда яркость цели совпадает с яркостью фона, при наличии дистрактора, движущегося в противоположном направлении, в случае точечного фона, движущегося в том же направлении, что и цель.

Время входа в зону интереса. Определяется как время с момента экспозиции целевого изображения до первого попадания взора в заданную зону интереса. Помимо времени в миллисекундах, может также определяться как число событий определенного типа, прошедших с начала экспозиции, например число выполненных фиксаций или число рассматриваний уникальных зон интереса. Короткое время входа интерпретируется как показатель высокоэффективной локализации целевого объекта.

Время возврата. Время, через которое наблюдатель возвращается к рассматриванию ранее уже фиксировавшейся зоны интереса.

Альтернативная форма показателя – число фиксаций, выполненных наблюдателем с момента предыдущего рассматривания данной зоны интереса. Время возврата представляет интерес в случае, когда изображение в зоне интереса меняется в ходе пробы, либо в случае, когда повторное рассматривание выделенной зоны интереса связано с решением определенной задачи и характеризует нагрузку на рабочую память.

Интервал между рассматриванием изображения и речью. Показатель измеряется в миллисекундах либо в числе единиц рассматриваемого изображения (слов, букв, нот и т.д.). Как правило, измеряется интервал между началом экспозиции изображения и началом его вербального описания (латентность глаз-голос) либо между вербальной отсылкой к объекту и взглядом на него (латентность голос-глаз).

Измерение данного интервала возможно без регистрации движений глаз. Для этого используется следующий экспериментальный прием: во время воспроизведения визуального ряда гасится свет и затем определяется объем информации, которую участник исследования смог воспроизвести после выключения света. Применение данной техники, однако, может давать результаты, отличающиеся от получаемых при регистрации движений глаз.

Латентность глаз–рука. Показатель широко используется при изучении координации движений. Измеряется в миллисекундах, либо в числе единиц, релевантных решаемой задаче. Латентность может составлять от –3 до 1,5 с (отрицательная латентность означает опережающее движение руки). Величина латентности существенно зависит от конкретной решаемой задачи, опыта участников, условий выполнения задания. Латентность глаз–рука может интерпретироваться как результат конкуренции двух задач: удержания объекта в рабочей памяти для эффективного выполнения движений и оптимизации нагрузки на рабочую память.

Латентность движений глаз при совместной деятельности. При изучении совместной деятельности с одновременной регистрацией движений глаз двух участников исследования возникает задача измерения временной дистанции между позициями взора. Следует отметить, что исследования такого рода сложны в методическом плане, а получаемые результаты значительно различаются. Так, в задаче совместного построения объекта латентность составляет около 500 мс.

Дистанция между направлением взора и позицией курсора мыши. Вычисляется, как евклидова дистанция между экранными координатами в пикселях или в угловых градусах. Величина

дистанции существенно зависит от способа использования курсора «мышь», выбранного испытуемым. В частности, во время чтения курсор мыши может располагаться в позиции чтения, следуя за взором, либо отмечать фрагменты текста, к которым потребуется вернуться по ходу чтения. Применение показателя можно считать полностью оправданным в ситуации, когда по ходу эксперимента требуется координированное перемещение курсора мыши, отслеживаемое взором.

Усиление следящих движений. Показатель определяется как отношение скорости перемещения взора к скорости движения целевого объекта. Значение, равное 1,0 говорит о том, что имеет место точное следование взора наблюдателя за объектом без отставания или опережения. Как правило, скорость перемещения взора несколько ниже, чем скорость объекта. Для компенсации отставания наблюдатель время от времени выполняет корректирующие саккады. Для синусоидально двигающегося целевого объекта вводится понятие «пиковое усиление», определяемое как отношение пиковой скорости движения глаза к скорости цели. Альтернативная форма данного показателя – частота корректирующих саккад.

Величина усиления зависит от наличия отвлекающих факторов, направления и формы движения, возраста испытуемых, наличия заболеваний, использования медицинских препаратов.

Практика обработки айтрекингových данных

На сегодняшний день не существует готовых универсальных компьютерных программ для обработки айтрекингových данных. Производители оборудования реализуют в основном функциональность, достаточную для решения основных практических задач. Учет пожеланий исследователей привел бы к значительному усложнению и удорожанию программного обеспечения.

Недавно появившаяся программа Eye Works (Eye Tracking Inc., США) позиционируется как универсальное ПО, работающее с большинством современных айтрекингových систем. На сегодняшний день на сайте разработчика указана совместимость с 18 системами 8 производителей. Дополнительно разработчик заявляет о возможности адаптации ПО под оборудование, используемое покупателем. Однако, судя по приведенному описанию, функциональность программы в части анализа ограничена наиболее употребительными базовыми функциями.

Известна, по крайней мере, одна попытка создания универсальной Open Source программы для обработки айтрекингových

данных – проект OGAMA. Получившаяся программа весьма громоздка и плохо структурирована, что затрудняет внесение исправлений и расширение функциональности кем-либо, кроме авторов программы.

В результате общепринятая до недавнего времени технология обработки айтрекинговых данных включала: расчет конкретных показателей окуломоторной активности с использованием штатного программного обеспечения, поставляемого производителем айтрекера, группировку полученных результатов согласно конкретному экспериментальному плану в Excel и заключительную статистическую обработку в SPSS.

Недостатком данного подхода является высокая трудоемкость и низкая ненадежность, связанная с многочисленным ручным вводом. Помимо этого, значительные проблемы связаны с использованием для первоначальной обработки данных штатного ПО айтрекера. В такой программе не может быть реализован расчет значительной части показателей окуломоторной активности, а детали реализации конкретных алгоритмов работы могут представлять собой «коммерческую тайну» производителя. Дополнительным препятствием для эффективного использования может стать защита штатных программ обработки от копирования, создающая на этапе обработки данных немалые организационные трудности.

В современных западных исследованиях наметилась тенденция к выполнению сквозной обработки данных с помощью интерпретируемых языков программирования.

Современные айтрекинговые методики значительно расширяют функциональные возможности регистрации движений глаз. В то же время переход от аналоговой регистрации (использовавшейся в фотооптическом и электромагнитном методах) к компьютеризированной цифровой видеорегистрации привел к определенной подмене объекта исследования. Выполняя дискретную цифровую запись непрерывного движения, невозможно непосредственно получить точную информацию относительно скорости и ускорения. Фактически, в основе выполняемой айтрекинговой системой аппроксимации дискретных отсчетов непрерывной функцией лежат представления о характере движений глаз, сформировавшиеся в 1960–1970 гг. в ходе экспериментов с применением контактных аналоговых методик. Понимание принципов работы современного оборудования предполагает знание истории окулографии.

АЙТРЕКИНГ В СТРУКТУРЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последние годы российская психологическая наука переживает ренессанс объективных методов исследования, тесно связанный с развитием экспериментального подхода. Благодаря новейшему оборудованию и технологиям восстанавливается ключевая роль аппаратного эксперимента в психологии. Этот процесс захватывает и окулографию – совокупность инструментов и процедур регистрации направленности взгляда человека.

Переоснащение инструментально-технологической базы психологии

Основу современных экспериментально-психологических исследований составляют информационные и телекоммуникационные технологии. Показателем прогресса является использование мощных компьютеров и оригинального программного обеспечения. Развитые базы данных существенно расширяют потенциал и перспективу исследований. Благодаря Всемирной паутине открываются возможности транспортировки экспериментальных данных, их обработки и анализа в тех научных центрах, где существуют наиболее подходящие условия и технологии. Исследования выходят за рамки отдельных организаций и все чаще принимают интернациональный характер.

Совершенствуются периферийные технические устройства. Прежде всего те из них, которые формируют (с заданными параметрами) информационную среду человека или, в более специальных терминах, потоки стимуляции. Сюда относятся различного рода дисплеи, информационные панели, гибкие экраны, синтезаторы звуков, акустические системы, игольчатые матрицы, виртуальные комнаты и др. С развитием компьютерной графики появилась

возможность конструирования практически любого визуального стимульного материала. К подобным методам относятся: пространственный морфинг и варпинг сложных изображений, техники прототипирования, модели морфируемого синтеза трехмерных изображений, создаваемые на основе лазерного сканирования реального объекта, восстановление и компьютерная анимация сложных изображений по отдельным фрагментам и др. Прогресс экспериментальной психологии связан с наличием современных устройств регистрации деятельности и общения людей, начиная с кнопочных пультов и джойстиков и заканчивая камерами видеонаблюдения.

Совершенствование вычислительной техники подтолкнуло развитие процедур измерения и обработки данных. Получили распространение методы многомерного шкалирования, кластерного анализа, использование «мягких вычислений», анализ латентных структур, аппарат качественного интегрирования. Открылась возможность применения новой стратегии научного исследования, ориентированной на выявление многокачественности и динамизма психических явлений, а также роли «вторичных», или многократно опосредованных детерминант, выявление которых требует больших массивов данных.

Результатом технического переоснащения становится интенсивный рост экспериментальных исследований, повышение их качества и реорганизация всей инструментальной базы психологии. Роль и значение отдельных методов изменились. Так, 30–40 лет назад видеорегистрация глаз считалась грубым, очень трудоемким и малоперспективным методом исследования. Сегодня, благодаря созданию высокоскоростных видеокамер, снимающих состояние поверхности глаз в инфракрасном световом диапазоне, и использованию специализированных медиаресурсов, айтрекинг – один из удобных и достаточно точных инструментов, часто применяемых как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях.

Несмотря на безусловные достижения в инструментально-технической области, существует немало обстоятельств, ограничивающих оптимизм экспериментаторов. Становится очевидным, что при использовании универсальных офисных операционных систем Windows высокая точность (менее 10 мс) дозирования времени экспозиции сложных изображений или измерения времени реакции в принципе недостижимы. В силу больших задержек сигнала экспериментатор не имеет возможности непосредственно включиться в контур управления двигательных систем для изучения их характеристик. Непросто обстоят дела с программным обеспечением айтрекеров: существуют сложности в дифференци-

ации малоамплитудных саккад и ускоренных дрейфов, не отлажена калибровка величины раскрытия зрачка, не решена проблема шумов, порождаемых самим программным обеспечением. Немалые трудности связаны с эффективным использованием мобильных видеорегистрирующих систем.

Конечно, не каждый психологический эксперимент требует современного оборудования и «высоких технологий». Речь идет об уровне развития экспериментального метода и профессиональной культуре его использования. За ними стоят высокие требования к содержанию информационной среды, в которую погружается испытуемый, к точности измерений и оценки его ответов, к адекватности применяемых вычислений, критериев валидности и надежности данных, а также к уровню подготовки самого экспериментатора. Современный инструментарий задает планку качества лабораторного психологического исследования, существенно расширяет его горизонт и готовность использования получаемых результатов в решении практических задач.

Специфика предмета психологического исследования

Отдавая должное инструментальной стороне науки, необходимо иметь в виду, что глубинные основания методических проблем экспериментальной психологии лежат не столько в технической или вычислительной, сколько в предметно-содержательной плоскости исследований – прежде всего, в природе человека, способного к саморегуляции, саморазвитию, самореализации и самосовершенствованию. До сих пор эта способность – центральная, с точки зрения психологической науки, – является слабо контролируемым фактором. В ходе эксперимента испытуемый не остается нейтральным ни по отношению к процедуре, ни по отношению к используемому оборудованию, ни по отношению к исследователю. В этом существенное отличие психологии от большинства естественных наук и принципиальное ограничение экспериментально-психологического метода. Участие в психологическом исследовании и в качестве испытуемого, и в качестве экспериментатора – всегда событие жизни человека, факт биографии, не только раскрывающий, но так или иначе меняющий его самого. Организуя эксперимент, психолог вынужден балансировать между альтернативными требованиями: либо контролировать заранее определяемые переменные и ответы на них (что соответствует нормам естественнонаучного познания), либо доверять своему внутреннему опыту, интуиции, интерпрети-

руя внутренний мир другого (что отвечает требованиям гуманитарного познания, родственного искусству и литературе). В первом случае возникает опасность потерять субъектность, или активное начало человека, во втором возможность установить строгие и точные (в математическом смысле) зависимости. Мастерство исследователя заключается в том, чтобы удержать обе крайности вместе. С этой тенденцией связан возросший интерес к качественным методам, которые выстраиваются на иных (по сравнению с количественным анализом) принципах. Современные технологии позволяют сблизить качественный и количественный подходы в рамках конкретных исследований и расширить объем полезной информации путем обращения к базам многомерных данных.

Другое основание методических проблем экспериментальной психологии связано с системной организацией и развитием психических явлений. Они обладают исключительной вариативностью, динамизмом, взаимопроникают друг в друга и онтологически неотделимы. Это противоречит аналитичности исследовательских процедур, ориентированных на выделение определенной детерминанты или группы детерминант. Каждый эмпирический факт по своему психологическому содержанию оказывается многозначным. Преодоление неопределенности требует от исследователя контроля как за отдельным аспектом (срезом или моментом) изучаемого явления, так и за способами его включения в более масштабное целое. Сделать это безотносительно к другим аспектам (срезам или моментам) психики или поведения не представляется возможным. Эффективность исследований связана с согласованной оценкой ряда параметров и ключевых измерений психических явлений, которую трудно достичь без дополнения процедуры эксперимента наблюдением, тестированием, глубинным интервью, дебрифингом и другими методами. С этой точки зрения, перспектива использования методов окулографии лежит на пути создания средств, учитывающих многозначность отношений направленности глаз либо головы с другими проявлениями познавательных процессов, состояний и деятельности человека.

Конечным результатом исследований любого феномена психики либо поведения является раскрытие подвижной системы детерминант, которая конституируется не только средой или миром, но и самим человеком, формами его активности. Наряду с причинно-следственными связями, в число детерминант входят общие и специальные предпосылки психических явлений, опосредствующие звенья, внешние и внутренние условия, факторы и т. п. Они действуют как последовательно, так и параллельно; каждый из них

имеет в структуре целого ограниченную «зону влияния» и «вес». В ходе взаимодействия человека с миром соотношение между детерминантами перманентно меняется. То, что в одной ситуации выступает в роли предпосылки, в других ситуациях может оказаться причиной, фактором или опосредствующим звеном. Любой результат развития (когнитивный, личностный, операциональный) включается в совокупную детерминацию психического, создавая возможность его перехода на новую ступень. Сказанное означает, что и при организации экспериментального исследования, и при объяснении конкретного феномена необходимо учитывать не только отдельные характеристики, но и собственную организацию детерминационных процессов и ее свойств: гетерогенность, нелинейность, динамичность, многократную опосредованность, гетерохронность. Возникает необходимость разработки собственной логики движения детерминант, их взаимопереходов и взаимовключений как важнейшего условия получения нового эмпирического знания. Складываются предпосылки стратегий исследования, ориентированных на анализ порождения психических явлений. Этой тенденции соответствуют возможности современных технологий, позволяющие контролировать большое количество переменных и изменять информационное содержание ситуации в зависимости от состояния изучаемого процесса.

Новые технологии и перспективы изучения окуломоторной активности человека

В данном контексте разрабатываются новые схемы айтрекинговых исследований с одновременной регистрацией движений глаз двух и более участников. Попытки изучения зрительного поиска и идентификации объектов в формате парного эксперимента делались еще в 70-х годах прошлого столетия, но ограничивались записями движений глаз одного из испытуемых. Одного – потому, что второй установки, позволяющей регистрировать окуломоторную активность, не было. Запись движений велась контактным способом с помощью центральной присоски, установленной на анестезированном глазном яблоке. Голова испытуемого фиксировалась в подбороднике, а его речь исключалась. В этих условиях влияние общения на перцептивный процесс устанавливалось на том основании, что маршруты внимания контрольного испытуемого при индивидуальном и совместном поиске изменялись. Конкретные способы взаимодействия испытуемых, в том числе соотношение индивидуальных стратегий поиска объекта, оставались неясными. Сего-

дня, благодаря одновременному использованию нескольких высокоскоростных айтрекеров и специализированного программного обеспечения, эта методически сложная задача успешно решается. Согласно полученным данным, влияние стратегий зрительного поиска каждого из наблюдателей взаимное, а их уподобление друг другу, что отмечалось ранее, не бывает полным и возникает лишь в определенных фазах общения. Эти результаты выводят исследователей на проблему *совместного внимания* и управления им в групповой деятельности. Важным представляется и еще один момент. Благодаря современным технологиям открывается возможность в ходе совместного поиска либо идентификации объекта регистрировать высказывания испытуемых и соотносить их с записями окуломоторной активности. Это позволяет, с одной стороны, содержательно интерпретировать окулограммы и прогнозировать маршруты совместного внимания, с другой стороны – «привязывать» высказывания к определенной области зрительного пространства. Складывается новый метод исследования – *топосемантический анализ* восприятия.

Для современного человека компьютер является универсальным бытовым прибором, используемым для решения широкого круга задач. Изучение активности пользователя в ходе работы за компьютером приобретает, таким образом, важнейшее практическое значение. В ближайшее время нас ожидает переход от парадигмы лабораторного компьютеризированного эксперимента, предполагающего выполнение поставленных экспериментатором заданий, к парадигме естественного компьютеризированного эксперимента. Необходимым требованием к оборудованию для таких исследований является полная интеграция айтрекера в операционную систему компьютера, обеспечение регистрации движений глаз на уровне драйвера ОС. Благодаря этому будет достигнута высокая стабильность работы и точная синхронизация событий: изменения положения взора, смены экспонируемого на экране изображения, нажатия кнопок клавиатуры, перемещений «мыши» и т. д. Решение данной задачи потребует внесения соответствующих изменений в код операционной системы, что наиболее просто выполнимо для ОС Linux. Технически такой айтрекер мог бы быть реализован в виде нескольких компактных видеокамер, закрепляемых на рамке монитора.

Одновременная регистрация выполняемых пользователем операций и его окуломоторной активности в ходе решения практических задач (поиск информации в Интернете, набор текста, компьютерные игры, чтение, просмотр видео и т. д.) выведет экс-



Рис. 46. С. Брин в очках со встроенным компьютером (фотография из журнала «Огонек», 26 августа 2013 г., № 33)

периментальную психологию на новый уровень, позволит перейти от изучения отдельных психических явлений к анализу реального поведения, деятельности, общения.

На рисунке 46 представлена фотография Сергея Брина – одного из основателей Google Inc. В оправе и стеклах очков (Google Glass) вмонтирован компьютер. Последнее означает, что совсем скоро подобные устройства появятся на рынке и наверняка будут пользоваться немалым спросом. Нетрудно предположить, что массовое производство Google Glass приведет к непростым психологическим проблемам их использования и к возникновению качественно нового оборудования и технологий регистрации окуломоторной активности человека.

Анализ текущих исследований, выполняемых с привлечением современных технологий регистрации движений глаз, показывает, что восстановление окулографии в качестве эффективного метода изучения познавательных процессов, состояний человека, его деятельности и общения проходит в России весьма активно. Проблема направленности/движений взора вновь начинает занимать в отечественной науке важное место.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреева Е. А., Вергилес Н. Ю., Ломов Б. Ф.* Механизм элементарных движений глаз как следящая система // Моторные компоненты зрения. М.: Наука, 1975. С. 7–55.
- Барабанщиков В. А.* Окуломоторные структурные восприятия. М.: ИП РАН, 1997.
- Барабанщиков В. А.* Восприятие и событие. СПб.: Алетейя, 2002.
- Барабанщиков В. А.* Психология восприятия. Организация и развитие перцептивного процесса. М.: Когито-Центр, 2006.
- Барабанщиков В. А.* (отв. ред.). Современная экспериментальная психология. М.: ИП РАН, 2011.
- Барабанщиков В. А.* Экспрессии лица и их восприятие. М.: ИП РАН, 2012.
- Барабанщиков В. А., Белопольский В. И.* Функциональная гибкость глазодвигательной системы человека // Мозг и психическая деятельность. М.: Наука, 1984. С. 230–235.
- Барабанщиков В. А., Белопольский В. И.* Стабильность видимого мира. М.: ИПРАН, 2008.
- Барабанщиков В. А., Белопольский В. И., Вергилес Н. Ю.* Методы оптической трансформации зрительной обратной связи в исследованиях глазодвигательной системы человека // Движения глаз и зрительное восприятие. М.: Наука, 1979. С. 71–84.
- Барабанщиков В. А., Белопольский В. И., Вергилес Н. Ю.* Оптические методы трансформации зрительной обратной связи // Психологический журнал. 1980. № 3. С. 35–90.
- Белопольский В. И.* Взор человека: механизмы, модели, функции. М.: ИП РАН, 2007.
- Белопольский В. И., Вергилес Н. Ю.* Фотоэлектрический метод регистрации ротаторных движений глаз человека // Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1990. № 5. С. 51–55.

- Благовещенская Н. С.* Электронистагмография при очаговых поражениях головного мозга. М.: Медицина, 1968.
- Владимиров А. Д.* Методы исследования движений глаз. М.: МГУ, 1972.
- Галактионов А. И.* Основы инженерно-психологического проектирования АСУ ТП. М.: Энергия, 1978.
- Гиппенрейтер Ю. Б.* Движение человеческого глаза. М.: МГУ, 1978.
- Гроссер О., Гроссер-Корнельс У.* Физиология зрения // Основы сенсорной физиологии. М.: Мир, 1984. С. 142–197.
- Гуревич Б. Х.* Движения глаз как основа пространственного зрения и как модель поведения. Л.: Наука, 1971.
- Завалишина Д. Н.* К проблеме формирования стратегии при решении дискретных оперативных задач // Вопросы психологии. 1965. № 5. С. 71–81.
- Запорожец А. В., Венгер Л. А., Зинченко В. П., Рузская А. Г.* Восприятие и действие. М.: Просвещение, 1967.
- Зинченко В. П.* Некоторые особенности ориентировочных движений руки и глаза и их роль в формировании двигательных навыков // Вопросы психологии. 1956. № 6. С. 50–64.
- Зинченко В. П., Вергилес Н. Ю.* Формирование зрительного образа. М.: МГУ, 1969.
- Крищунас К. С., Лауритис В. П.* Методика совместной регистрации микро- и макродвижений глаз // Вопросы психологии. 1977. № 3. С. 123–126.
- Лауритис В., Крищунас К., Луук А., Хунк Я., Аллк Ю.* Развитие электромагнитной методики регистрации движений глаз человека // Труды по психологии. Т. IV. Тарту, 1977. С. 34–51.
- Ломов Б. Ф.* Методологические и теоретические проблемы психологии. М.: Наука, 1984.
- Ломов Б. Ф.* Системность в психологии. М.–Воронеж: АПСН, 1996.
- Ломов Б. Ф.* Психическая регуляция деятельности. Избранные труды. М.: ИП РАН, 2006.
- Ломов Б. Ф., Вергилес Н. Ю.* (отв. ред.) Моторные компоненты зрения. М.: Наука, 1975.
- Милсум Дж.* Анализ биологических систем управления. М.: Мир, 1968.
- Митькин А. А.* Электроокулография // Эргономика: принципы и рекомендации. М., ВНИИТЭ, 1970. С. 206–215.
- Митькин А. А.* Электроокулография в инженерно-психологических исследованиях. М.: Наука, 1974.
- Митькин А. А., Козлова Е. В., Сергеенко Е. А., Ямщиков А. Н.* Некоторые вопросы раннего онтогенеза зрительных сенсомоторных

функций // Движение глаз и зрительное восприятие. М.: Наука, 1978. С. 9–70.

Назаров А. И., Гордеева И. Д., Романюта В. Г. Аfferентные регуляции в зрительном восприятии // Эргономика. 1972. № 2. С. 110–130.

Смирнов В. П. Автоматизированный метод регистрации движения глаз оператора-наблюдателя оптического прибора: Автореф. дис. ... канд. технических наук. 1985.

Смирнов В. П. Методы регистрации движений глаз с использованием роговичного блика // Труды ГОИ. 1984. Т. 57. С. 76–87.

Тихомиров О. К. Структура мыслительной деятельности человека. М.: МГУ, 1969.

Шахнович А. Р. Мозг и регуляция движений глаз. М.: Медицина, 1974.

Ярбус А. Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965.

Ditchburn R. W. Eye movements and visual perception. Oxford: Clarendon. 1973.

Holmqvist K., Niström M., Andersson R., Dewhurst R., Jarodzka H., Weijer J. Eye tracking: a comprehensive guide to methods and measures. N. Y.: Oxford University Press, 2011.

Duchowski A. T. Eye Tracking methodology: Theory and Practice. L.: Springer Verlag, 2003.

Liverberdige S. P., Gilchrist I. D., Everling S. (Eds). The Oxford Handbook of Eye Movements. L.: Oxford University Press, 2011.

Sharma R., Hicks S., Berna C., Kennard C., Talbot K., Turner M. Oculomotor Dysfunction in Amyotrophic Lateral Sclerosis: A Comprehensive Review // Archives of Neurology. 2011. V. 68. P. 857–861.

Приложение

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО КУРСУ «МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ В ПСИХОЛОГИИ»

Учебный курс «Методы регистрации движений глаз в психологии» ориентирован на профессиональную подготовку магистрантов и аспирантов психологических кафедр ВУЗов, специализирующихся по направлениям «Экспериментальная психология», «Когнитивная психология», «Психофизиология», «Клиническая психология» и др. Курс призван сформировать научные представления об окуломоторной активности человека, ее роли в процессах познания, деятельности и общения и привить навыки работы с современным исследовательским оборудованием и технологиями.

Программа курса

Цели:

- обучение основам современных методов регистрации движений глаз человека.
- формирование практических навыков, необходимых для психологов, занятых в прикладной и научно – исследовательской деятельности.

Задачи:

- на примере окулографии сформировать у молодых психологов положительную мотивацию к работе с современными аппаратными методами;
- представить окулографию как метод психологического исследования;
- раскрыть современные представления о природе глазодвигательной активности, ознакомить учащихся с основными методами регистрации движений глаз;

- привить студентам навыки исследовательской деятельности, обучить работе на установках для видеорегистрации движений глаз, продемонстрировать возможности различных пакетов прикладных программ, позволяющих конструировать эксперименты с регистрацией направленности взора и эффективно анализировать эмпирические данные;
- создать условия для профессиональной и личностной самореализации студентов.

В результате изучения курса студенты будут знать:

- основные понятия окулографии;
- виды движений глаз, их характеристики;
- механизмы регуляции движений глаз;
- детерминанты окуломоторной активности;
- роль движений глаз в процессах познания, деятельности и общения;
- историю развития науки о движении глаз;
- современные методы регистрации движений глаз;
- сферы применения и возможности использования окулографии в современной научно-исследовательской и практической деятельности;
- технологию подготовки и проведения эксперимента с использованием систем видеорегистрации движений глаз;

В результате освоения программы курса студенты будут уметь:

- проектировать и готовить исследования с использованием системы видеорегистрации движений глаз;
- формировать стимульный материал для проведения исследования;
- использовать программы для предъявления стимульного материала, обработки и анализа полученных в ходе эксперимента данных;
- грамотно интерпретировать окуломоторные данные.

Содержание курса

Учебный курс состоит из двух модулей – теоретического и практического (лабораторного).

В теоретической части дается история развития науки о движениях глаз, рассматриваются психологические и психофизиологические основания окулографии, обсуждается природа глазодвигательной активности человека. Описываются методы регистрации движений глаз, способы их оценки и интерпретации данных.

Практическая часть включает подготовку и проведение студентами самостоятельных экспериментальных исследований с использованием оборудования для видеорегистрации движений глаз, обработку и анализ данных.

Темы

I. *Основы окулографии: принципы и организация исследований*

Объективные методы познания психики и поведения. Аппаратная регистрация проявлений психических явлений. Окулография в структуре экспериментально-психологических исследований. Запросы практики: инженерная психология, эргономика, медицина, реклама и т. д.

Тема 1. **Наука о движениях глаз.** Этапы становления. Характеристика предмета и метода. Проблемное поле. Современное состояние и тенденции развития.

Тема 2. **Основные понятия окулографии.** Глаз человека как орган зрения и движения. Оптика глаза. Строение и функции сетчатки. Экстраокулярные мышцы. Направленность взора. Основные виды движений глаз (тремор, дрейф, микросаккады, макросаккады, прослеживающие движения, вергентные, торзионные движения, нистагм). Понятия фиксации и целенаправленного поворота глаз. Окуломоторная активность. Функции и механизмы регуляции движений глаз. Глазодвигательная система и ее свойства. Окуломоторные структуры. Окуломоторное поле наблюдателя.

Тема 3. **Направленность взора в процессах познания, деятельности и общения людей.** Роль движений глаз в зрительном восприятии. Движения глаз как предикторы познавательных процессов. Направленность взора и характеристики внимания. Понятие функционального поля зрения. Функциональное поле. Окуломоторная активность в процессах поиска и идентификации комплексных объектов. Движения глаз во время чтения.

Окулография в практической деятельности человека (управление технологическими объектами, оценка профессиональной деятельности и др.) Диагностика психических заболеваний и нарушений познавательных процессов.

II. *Процедуры регистрации и анализа движений глаз*

Тема 4. **Методы регистрации движений глаз.** Контактные методы: электроокулография, фотооптический, электромагнитный. Бесконтактные методы: фотоэлектрический метод, видеорегист-

рация. Примеры современного оборудования для регистрации движений глаз.

Тема 5. Оборудование для видеорегистрации движений глаз. Особенности установок SMI High Speed, SMI HED, SMI RED-m*. Программное обеспечение (ПО) iViewX для регистрации движений глаз. Программное обеспечение SMI Experimental Center для проведения исследований, его ограничения. Подготовка и проведение эксперимента с помощью iViewX и Experiment Center.

Тема 6. Проведение исследований с использованием для предъявления стимульного материала нестандартного ПО. Протокол iViewX remote commands. Проблема калибровки. Принципы создания собственного ПО для предъявления стимульного материала. Подготовка и проведение экспериментальных исследований с использованием нестандартного ПО. Gaze Contingent Paradigme.

Тема 7. Обработка окулографических данных. Штатное программное обеспечение BeGaze для обработки данных. Закрытый формат хранения данных iView Data File (IDF). Конвертация данных с помощью IDF Converter. Структура конвертированного файла данных. Визуализация данных с использованием пакета статистической обработки R. OGAMA: альтернативное ПО для обработки результатов исследований.

Тема 8. Проблема детекции фиксаций и саккад. Алгоритмы детекции: I-DT – Dispersion Threshold Identification, I-VT – Velocity Threshold Identification, I-HMM – Hidden Markov Model Identification, I-MST – Minimum Spanning Tree Identification, I-KF – Kalman Filter Identification. Адаптивный алгоритм детекции Холмквиста. Штатное ПО EventDetector для выполнения детекции саккад и фиксаций.

Тема 9. Принципы анализа окулomotorной активности. Основные показатели окулomotorной активности: продолжительность фиксаций, продолжительность первой фиксации, позиции фиксаций, амплитуда саккад, латентность саккад, величина раскрытия зрачка. «Область интереса» и связанные с ней показатели окулomotorной активности: суммарное время рассматривания, число фиксаций, средняя продолжительность фиксаций, порядок рассматривания. Проверка значимости различий показателей внутри экспериментального условия и между разными экспериментальными условиями.

Тема 10. Специфика анализа окулomotorной активности при чтении текста. Показатели окулomotorной активности при чтении текста: число последовательных фиксаций (без возвратов), число

* Перечень установок, используемых Центром экспериментальной психологии МГППУ.

возвратов, при которых происходит переход к предыдущему слову, число возвратов внутри слова, число возвратных фиксаций.

Тема 11. Проблема интерпретации окулограмм. Многозначность направленности взгляда. Системы связей и отношений, включающие данные о движениях глаз. Основные уровни и каналы связи активности человека с движениями его глаз. Детерминанты окуломоторной активности. Зрительный и фиксационный «центры тяжести». Природа перцептивно-окуломоторного соответствия.

Тематический план занятий

| № | Тема | Все-го | Лек-ции | Семи-нары | Самост. работа |
|----|---|--------|---------|-----------|----------------|
| 1 | Наука о движениях глаз | | 2 | | 2 |
| 2 | Основные понятия окулографии | | 2 | 2 | 4 |
| 3 | Направленность взгляда в процессах познания, деятельности и общения | | 2 | | 2 |
| 4 | Методы регистрации движений глаз | | 2 | | 2 |
| 5 | Оборудование для видеорегистрации движений глаз | | 4 | 2 | 2 |
| 6 | Проведение исследований с использованием нестандартного ПО | | | 2 | 4 |
| 7 | Обработка окулографических данных | | | 4 | 6 |
| 8 | Проблема детекции фиксаций и саккад | | 2 | | 4 |
| 9 | Принципы анализа окуломоторной активности | | | 4 | 4 |
| 10 | Специфика анализа окуломоторной активности при чтении текста и рассматривании сложных изображений | | | 4 | 4 |
| 11 | Проблема интерпретации окулограмм | | 2 | 2 | 2 |
| | | 72 | 16 | 20 | 36 |

Материально-техническое обеспечение учебной программы

Практические занятия проводятся на установках для видеорегистрации движений глаз (в частности SMI High Speed, SMI HED, SMI RED-m); программное обеспечение:

- Windows XP;

- SMI iViewX;
- SMI Experiment Center;
- SMi BeGaze.

Самостоятельная работа по обработке данных выполняется в компьютерном классе, оснащённом следующим программным обеспечением:

- Windows XP;
- R;
- OGAMA;
- MS Word;
- MS Excel.

Список рекомендуемой литературы

Основной

1. *Андреева Е. А., Вергилес Н. Ю., Ломов Б. Ф.* Механизм элементарных движений глаз как следящая система // Моторные компоненты зрения. М.: Наука, 1975. С. 7–55.
2. *Барабанщиков В. А.* Окуломоторные структуры восприятия. М.: ИП РАН, 1997.
3. *Барабанщиков В. А.* Экспрессии лица и их восприятие. М.: ИП РАН, 2012.
4. *Барабанщиков В. А., Жегалло А. В.* Регистрация и анализ направленности взгляда человека. М.: ИП РАН, 2013.
5. *Барабанщиков В. А., Харитонов В. Н.* Движение глаз при восприятии эмоциональных выражений лица // Познание в структуре общения. М.: ИП РАН, 2008. С. 30–39.
6. *Барабанщиков В. А., Ананьева К. И., Харитонов В. Н.* Организация движений глаз при восприятии изображений лица // Экспериментальная психология, 2009. Т.2. С. 31–60.
7. *Барабанщиков В. А., Жегалло А. В.* Методы регистрации движений глаз: теория и практика. <http://psyedu.ru>. 2010. № 5.
8. *Гиппенрейтер Ю. Б.* Движение человеческого глаза. М.: Изд-во МГУ, 1978.
9. *Гиппенрейтер Ю. Б.* О месте движений глаз в незрительных видах деятельности и их исследовании // Моторные компоненты зрения. М.: Наука, 1975. С. 213–221.
10. *Гуревич Б. Х.* Движения глаз как основа пространственного зрения и как модель поведения. Л.: Наука, 1971.
11. *Зинченко В. П.* Образ и деятельность. М.–Воронеж: МПСУ, 1997.

12. Ярбус А. Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965.
13. Guestrin E. D., Eizenman M. General theory of Remote Gaze Estimation Using the Pupil Center and Corneal Reflections // IEEE Transactions on biomedical engineering? 2006. V. 53. P. 1124–1133.
14. Nystrom M., Holmqvist K. An adaptive algorithm for fixation, saccade, and glissade detection in eye-tracking data // Behavior Research Methods, 2010. V. 42 (1). P. 188–204.
15. Salvucci D., Goldberg J. Identifying Fixations and Saccades in Eye-Tracking Protocols // Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium. N. Y.: ACM Press, 2000. P. 71–78.

Дополнительный

1. Барабанщиков В. А. Восприятие и событие. СПб.: Алетейя, 2002.
2. Барабанщиков В. А., Окутина Г. Ю., Окутин О. Л. Чувствительность айтрекеров и точность регистрации движений глаз // Современная экспериментальная психология. М.: ИП РАН, 2011. Т. 1. С. 191–212.
3. Барабанщиков В. А., Белопольский В. И. Стабильность видимого мира. М.: ИП РАН, 2008.
4. Барабанщиков В. А., Жегалло А. В. Распознавание экспрессий лица в ближней периферии зрительного поля // Экспериментальная психология, 2013. № 2. С. 59–85.
5. Белопольский В. И. Взор человека: механизмы, модели, функции. М.: ИП РАН, 2007.
6. Копеева В. Г. (отв. ред). Глазные болезни. М.: Медицина, 2002. С. 38, 40–41.
7. Окутин О. Л., Окутина Г. Ю. Оценка и нивелирование «шумов» айтрекера // Экспериментальная психология. 2011. № 1. С. 100–105.

Требования к экзамену (вопросы)

В ходе экзамена студент должен продемонстрировать знание теоретического материала и умение анализировать результаты экспериментального исследования, использующего регистрацию движений глаз. Вопрос практической части подбирается экзаменатором, исходя из тематики научных исследований студента.

Контрольные вопросы: теоретическая часть

1. Понятие окуломоторной активности человека.
2. История, современное состояние и тенденции развития науки о движении глаз.

3. Виды движений глаз, их характеристики.
4. Феномены окуломоторной активности.
5. Механизмы регуляции движений глаз. Глазодвигательная система и ее свойства.
6. Детерминация окуломоторной активности.
7. Роль движений глаз в процессах восприятия, познания, деятельности и общения.
8. Методы регистрации движений глаз.
9. Характеристика современного оборудования для регистрации окуломоторной активности человека.
10. Концептуализация данных о движении глаз.
11. Проблемы использования окулографии в исследованиях психики и поведения человека.

Контрольные вопросы: практическая часть

1. Анализ данных о движении глаз при идентификации экспрессий лица.
 2. Анализ данных о движениях глаз при чтении текста.
 3. Анализ данных о движениях глаз при рассматривании сложных изображений.
 4. Анализ данных о движениях глаз при восприятии рекламы.
 5. Анализ данных о движениях глаз при идентификации личности натурщика.
 6. Анализ данных о движениях глаз при выполнении дискриминационной задачи «одинаковый–разный».
- . —————

