

УДК 612.819.33

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-08-39-45

Пространственно-частотная фильтрация текста для локального и глобального анализа

© 2018 г. **А. М. Ламминпия***; **С. В. Пронин***; **Ю. Е. Шелепин***, **, ***, доктор мед. наук

*Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

**Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

***Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: lamminpiyaam@infran.ru

Поступила в редакцию 27.04.2018

Проведено исследование взаимодействия механизмов локального и глобального анализа изображений на уровне магно- и парвоцеллюлярных каналов зрительной системы человека. С помощью метода вейвлетной фильтрации изменяли пространственно-частотный состав текстов, предъявляемых наблюдателям. Показано, что постепенное размытие текстов с помощью вейвлетной фильтрации мешает работе парвоцеллюлярной системы, но при этом увеличивает вклад магноцеллюлярной системы при чтении. С ростом размера вейвлетного элемента парвоцеллюлярная система получает недостаточно информации для эффективной работы — и в этой ситуации именно магноцеллюлярная система определяет стратегию движений глаз. Также показан необходимый диапазон частот, обеспечивающий функционирование процесса чтения.

Ключевые слова: магно- и парвоцеллюлярная системы, саккады, чтение, пространственная частота, локальный и глобальный механизмы анализа изображений.

Коды OCIS: 330.4595, 330.6110, 330.5020, 330.5000, 330.2210.

ВВЕДЕНИЕ

Чтение — это одна из наиболее интересных форм взаимодействия, чередования активности перископического (панорамного) и телескопического (центрального) поля зрения и очередное проявление бинарных оппозиций.

В исследовании восприятия различных типов изображений зрительной системой существуют два основных подхода: определение глобальных статистических свойств изображений и выделение локальных информативных признаков высшего порядка. Ими описываются два механизма, которые могут быть задействованы при распознавании различных объектов — механизмы глобального и механизмы локального описания изображения. Возникает вопрос о том, при решении каких задач какой из этих подходов доминирует, как осуществляется их взаимодействие и как происходит построение целостного образа. Локальное описание изображения осуществляется на основе локальных признаков, глобальное — на основе статистических характеристик целостного изображения.

Согласно современным представлениям о пространственно-частотной фильтрации в зрительной

системе описание по локальным признакам обеспечивается парвоцеллюлярной системой, а магноцеллюлярная система осуществляет описание по глобальным признакам. Локальные признаки представлены типичными локальными признаками, общими для всех типов изображений (например, точки, фрагменты контура), выделяемыми рецептивными полями зрительной системы на ранних стадиях обработки изображения, и специфическими информативными признаками, характерными для конкретных изображений (например, фрагменты контура, несущие ключевую информацию). Специфические информативные признаки выделяются в зрительной системе детекторами точек, линий, углов, крестов, но при этом имеют сигнальное значение. В нейрофизиологии они носят название признаков высшего порядка. Для текста локальными признаками могут являться буквы, их фрагменты, различные знаки, слоги и слова, а к глобальным признакам следует отнести строки и абзацы.

Сканирующие движения глаз — это особый, практически ненужный в дикой природе, вид движений глаз. Но именно в процессе чтения глаза

читателя совершают сканирующие движения вдоль строк. Они представляют собой последовательность саккад (бросков) и фиксаций взора. Чтение требует точной, быстрой и ограниченной по времени синхронизации сложных окуломоторных, зрительных и когнитивных процессов. В недавней работе Ливерседжа с соавторами [1] взаимосвязь между системой, поддерживающей восприятие визуальной информации, и системой, ответственной за лингвистическую обработку, описана как антагонистическая. Помимо этого, не только движения глаз определяют, какая часть текста будет обрабатываться в этот момент, также оказывают влияние и характеристики печатного материала. Латентность, длительность, амплитуда и посадочная позиция саккады в определенной степени зависят от пространственной компоновки печатной информации, а также от лингвистической сложности (например, частотность слова, семантики, синтаксиса и пунктуации) прочитанного материала [2]. Следует отметить, что существующие модели окуломоторного контроля при чтении различаются тем, как визуальная информация влияет на окуломоторную активность [3, 4]. Идентификация факторов, которые взаимно ограничивают и влияют на соответствующие двигательные, перцептивные и когнитивные системы, представляет собой основу подтверждения для модельных предположений и серьезную проблему для эмпирических исследований. Одним из предполагаемых следствий взаимосвязи между глазодвигательной, зрительной и когнитивной системами является то, что читатели разрабатывают окуломоторную программу, которая оптимизирует время и объем их восприятия визуальной информации. Наиболее изученным типом такой окуломоторной программы является та, которая работает в границах перцептивного диапазона, т.е. в масштабе от одного до трех слов [3, 5]. Однако есть предположения, что мозг читателя может планировать и запускать программы, которые настроены на поддержание эффективной обработки в более глобальном масштабе, т.е. для всей строки или абзаца текста. Первое подобное предположение вытекало из наблюдения Пинте и Кеннеди [6] о том, что амплитуды последующих саккад увеличиваются по мере того, как глаза двигаются дальше слева направо по строкам (тексты на английском и французском языках). Позднее Куперман с соавторами [7] дополнили понятие глобальной окуломоторной программы: планирование движений глаз по всей линии текста. Они продемонстрировали резкое увеличение продолжительности одиночной фиксации, когда глаза двигались вправо через первые несколько слов предложения (эффект запуска), а затем плато с относительно стабильными длинами фиксации в середине предложения, и снова выраженный рост длительности фикса-

ции на последнем слове в предложении (эффект свёртывания) [8–10]. Куперман с коллегами (2010) показали, что влияние позиции слова на длительность фиксации является составным эффектом: эффект свёртывания имеет лингвистическую причину [11–13], тогда как эффект запуска имеет окуломоторную причину. Было замечено [7], что при чтении предложений на голландском и немецком языках первоначальное увеличение длительности фиксации происходит вместе с резким увеличением амплитуд саккад, аналогично эффекту, описанному Пинте и Кеннеди [6]. Но на более поздних позициях в предложении амплитуды саккады оставались неизменными или слегка увеличивались, но не уменьшались [7]. Тем не менее, эта модель поддерживает идею глобальной окуломоторной программы, которая направлена на поддержание эффективного и быстрого продвижения по строке.

Радак с соавторами [14] утверждали, что глобальные факторы (задача и контекст) влияют на локальный контроль движений глаз, показывая, что слова в предложении, представленном изолированно, обрабатываются иначе, чем слова в том же предложении, которому предшествует контекст. В своем предположении и в дальнейших разработках этой идеи [15] роль глобальных факторов ограничивается контекстуальными влияниями более высокого порядка, а не визуально ориентированными окуломоторными программами.

Аль-Занун с соавторами [16] показали последовательный эффект запуска в амплитудах саккады в предложениях, которые изменялись по длине, а также в случайных последовательностях слов, словах и строках символов. Резкое увеличение амплитуд саккад в первой трети предложения сопровождалось либо плато, либо менее резким увеличением. То, что эффект сохранялся во всех типах письменных материалов, даёт чёткие доказательства того, что характер эффекта является чисто визуальным, а не лингвистически ограниченным.

Понятие программы или схем, одновременно работающих в разных масштабах, является центральным для теории моторного управления, несмотря на то, что в исследованиях по окуломоторному контролю во время чтения они практически не исследованы. Теория моторного управления Шмидта [17] делит моторное программирование дискретных действий на два компонента: глобальную моторную программу и схему [18]. Глобальная моторная программа (GMP) отвечает за инвариантные параметры движений, такие как порядок следования и время, т.е. контролирует общую форму действия. Схема — это корректировка действия, которое должно выполняться в конкретных условиях [19] и отвечает за масштабирование действия в соответствии с требованиями окружающей среды. Можно предположить, что окуломоторный

контроль при чтении включает аналогичное взаимодействие между относительно стабильной обобщенной двигательной программой саккадических движений «слово за словом» и схемой, регулируемой определённой формой визуального объекта, настраиваемой на конкретную форму визуального объекта, подлежащего обработке, или выполняемую задачу.

Основываясь на том, что текст содержит в своём составе как локальные, так и глобальные признаки, изучение процесса чтения может способствовать развитию представлений о взаимодействии локальных и глобальных механизмов анализа изображений. Подвергая изображения с текстами вейвлетной фильтрации, мы можем менять их пространственно-частотный спектр, тем самым воздействуя на магно- и парвоцеллюлярные системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наблюдателям последовательно предъявлялось шесть тестовых изображений — фрагментов текста чёрными буквами на сером фоне (рис. 1). Фрагменты текста в среднем содержали 600 знаков с учётом пробелов и знаков препинания и были предварительно подвергнуты вейвлетной фильтрации при помощи многомасштабного разложения изображения с использованием DoG-функций (DoG — Difference of Gaussians) — вейвлетов, представляющих собой разность двух двумерных функций Гаусса. Основанием для использования данного типа вейвлетов является модель первичных этапов обработки изображения зрительным анализатором. Эта модель, предложенная рядом авторов [20, 21], основывается на экспериментальных данных С. Кафлера [22]. Согласно Д. Марру, наилучшей моделью для них служит обработка изображения набором $\nabla^2 G$ -фильтров, где ∇^2 — оператор Лапласа ($d^2/dx^2 + d^2/dy^2$), а G — функция Гаусса. Обработка изображения $\nabla^2 G$ -фильтром позволяет выделить на изображении резкие перепады яркости, соответствующие границам объектов,

причём, изменяя ширину гауссоиды G , можно осуществлять выделение границ на различных уровнях масштаба. Д. Марр предложил представлять $\nabla^2 G$ -фильтры при помощи разности двух гауссиан, то есть DoG-функции.

В зрительном анализаторе аналогом DoG-функций являются рецептивные поля с круговой симметрией, характерные, в частности, для сетчатки и латерального колленчатого тела. Оптимальным стимулом для таких клеток, т.е. изображением, на которое реагирует только небольшая группа нейронов с близкими по характеристикам рецептивными полями, является компактное изображение, не превышающее углового размера рецептивного поля, причём его пространственно-частотный спектр должен лежать внутри той полосы частот, на которую реагирует данная группа клеток. Этим требованиям отвечают либо сами DoG-функции, либо фрагменты изображения, подвергнутого цифровой фильтрации с использованием DoG-функций. В используемой нами программе Пронина С.В. был использован эффективный алгоритм обработки изображений набором $\nabla^2 G$ -фильтров, аппроксимируемых DoG-функциями, предложенный Бартом П. и Эдельсоном Е. [23]. Данный алгоритм позволяет разложить исходное изображение в «пирамиду лапласианов» — набор двумерных массивов коэффициентов, каждый из которых представляет собой результат применения к исходному изображению операции свёртки с DoG-функцией и последующей субдискретизации. Общее число уровней пирамиды было равно шести. Чем больше номер уровня пирамиды, тем больше ширина гауссоид в DoG-функции и соответственно тем крупнее масштаб деталей, описываемых на данном уровне. Ширина DoG-функции на двух соседних уровнях пирамиды отличалась в 2 раза. В качестве числовой характеристики размера DoG-функции удобно использовать расстояние между двумя минимумами в диаметральном сечении вейвлета, расположенными по обе стороны от центрального пика.

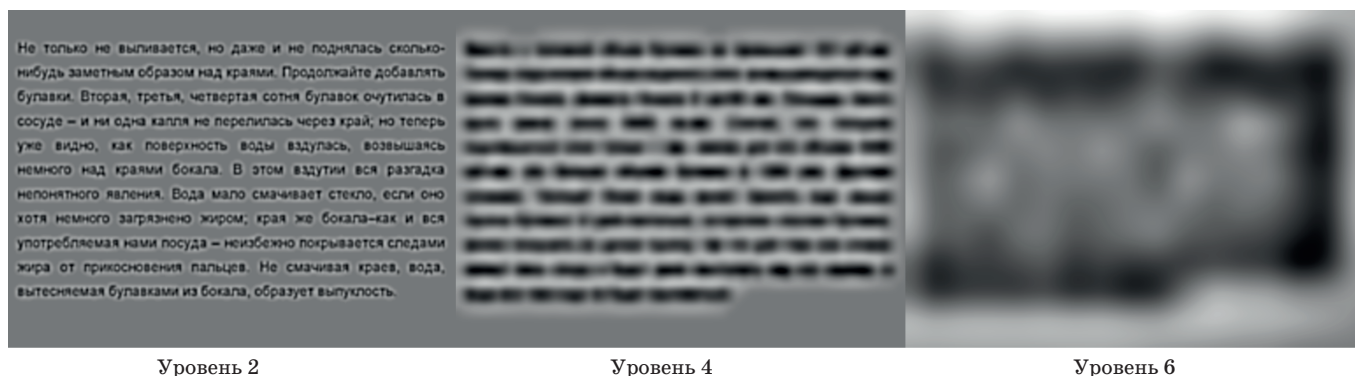


Рис. 1. Пример предъявляемых слайдов с текстами. Показаны результаты размытия текстов фильтрами разного размера.

Размер вейвлетных элементов на шести уровнях «пирамиды» в нашем случае был следующим: для уровня 1 — 8 пикселей, для уровня 2 — 16, для уровня 3 — 32, для уровня 4 — 64, для уровня 5 — 128 и для уровня 6 — 256 пикселей, что соответствует 13,92; 27,84; 55,68; 111,36; 222,72; 445,44 угловым минутам.

Размер букв оставался постоянным и в среднем составлял 5 мм (31,2 угл. мин) в ширину, 7 мм (43,8 угл. мин) в высоту, толщина ножки буквенного знака — 0,9 мм (5,4 угл. мин).

В исследовании принимали участие 25 наблюдателей. Им давали задание читать текст с экрана до тех пор, пока это возможно. Расстояние от глаз испытуемого до монитора, на котором предъявлялись тестовые изображения с текстами, составляло 60 см. Тестовые изображения предъявлялись при помощи 17" монитора с разрешением экрана 1280×1024. Для регистрации движения глаз в процессе чтения использовали систему iView XRed 250 (SMI, Германия).

Исследовали следующие параметры: количество и длительность саккад и фиксаций, время прочтения, общий паттерн движений глаз, а также зависимость всех этих параметров от углового размера вейвлетного элемента. Для оценки влияния пространственно-частотных характеристик текста на окуломоторную активность для каждого уровня вейвлетной фильтрации были рассчитаны спектры пространственных частот. Так как спектры изображения двумерные, они преобразовывались в одномерные путём усреднения их сечений с ориентациями 0, 45, 90 и 135 угловых градусов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уже на уровне паттернов окуломоторной активности можно заметить насколько влияют пространственно-частотные характеристики текстов на стратегию работы с ними. Тексты, размытые фильтрами 1 и 2 уровней, ещё читаемы, и при работе с ними испытуемые совершают типичные при чтении движения глаз — совершается большое количество горизонтальных саккад, направленных слева направо, некоторое количество возвратных саккад и совсем небольшое число вертикальных саккад. Тексты, обработанные фильтрами уровней 3 и 4, ещё сохраняют структуру, сходную с текстом, но чтение как таковое уже невозможно. Паттерн окуломоторной активности в этом случае ещё внешне схож с таковым при обычном чтении. Тексты, подвергнутые вейвлетной фильтрации уровней 5 и 6 пирамиды, также невозможно было прочесть, но при этом изображение теряло и типичную для текста структуру. В данном случае горизонтальные саккады уже не доминируют. Чтение превращается в просмотр сцены и паттерн становится дезорганизованным. Такое распре-

деление стратегий рассматривания текстов с различной степенью размытия было характерно для большинства читателей.

При первых двух уровнях размытия (размер фильтра 8 и 16 пикселей) время прочтения возрастает (уровень статической значимости $p < 0,05$), что отражает усложнение задачи — рост размера вейвлетного элемента пока не препятствует распознаванию символов и слов, но чёткость линий и контуров уже нарушается (рис. 2). Обработка символов и слов в таких условиях начинает требовать больших временных затрат. Начиная с уровней размытия 3 и 4 (размер вейвлетного фильтра 32 и 64 пиксела), время прочтения (или просмотра) начинает снижаться ($p < 0,001$). Аналогично выглядит и зависимость количества совершенных фиксаций взора от размера вейвлетного элемента (рис. 3).

Таким образом, вначале размытие текста усложняет его прочтение, и соответственно увеличивает время прочтения. Но с дальнейшим увеличением размера вейвлетного элемента прочитать текст становится невозможным, и время просмотра сцены снижается, так как, чем сильнее размываются признаки, характерные именно для текстов, тем меньше вероятность найти в нём локальные признаки, позволяющие опознать буквы или слова. В данном эксперименте вейвлетная фильтрация уровней 3 и 4 делает текст изображением,

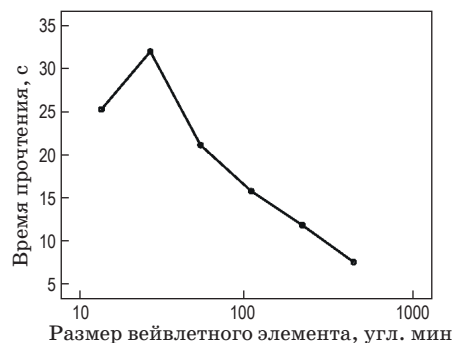


Рис. 2. Зависимость времени прочтения текста от размера вейвлетного элемента.

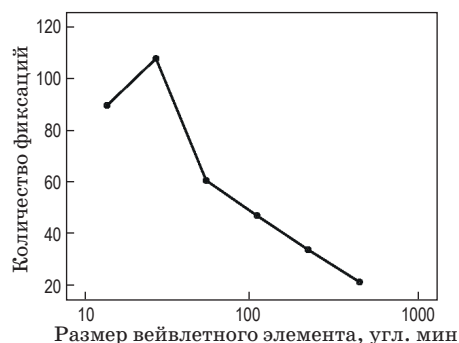


Рис. 3. Зависимость количества совершенных фиксаций взора от размера вейвлетного элемента.

которое сохраняет структуру страницы с текстом, но уже не является ею по сути. В действительности испытуемый не может прочесть эти тексты, но так как ему было дано задание читать текст, то он пытается найти в представленном изображении хотя бы некоторые локальные признаки текста, которые можно распознать, и, судя по характеру движений глаз, стратегия поиска, которую он выбирает, очень напоминает движения глаз при чтении. Дальнейшее увеличение размера вейвлетного элемента максимально сокращает время «чтения», так как достаточно небольшое количество времени, чтобы, проанализировав представленную сцену, понять, что в ней нет текста, и закончить просмотр. Эти стратегии работы с постепенно «размываемым» текстом находят отражение и в изменении количества фиксаций (и саккад, соответственно): с ростом размера вейвлетного элемента их количество снижается ($p < 0,001$).

С увеличением размера вейвлетного фильтра от 8 до 32 пикселей (1–3 уровень) длительность фиксации увеличивается ($p < 0,05$). Однако затем увеличение выражено слабо (рис. 4). То есть, с ростом размера вейвлетного элемента требуется большее время для анализа изображения, захватываемого фовеа. Известно, что средняя длительность фиксаций при выполнении какой-либо конкретной задачи меньше длительности фиксаций в ситуации, когда человек просто разглядывает зрительную сцену, не имея чётко обозначенной задачи [24]. В нашем исследовании было отмечено, что с повышением степени размытости текста достоверно увеличивается длительность фиксации. Это свидетельствует о том, что читатель вынужденно и постепенно перестаёт следовать данной ему инструкции, и работа с текстом превращается в просмотр изображения.

Длительность саккады с ростом степени размытия текста резких изменений не имеет, что согласуется с литературными данными о том, что длительность саккады в основном лежит в диапазоне 20–200 мс, а для чтения составляет порядка 10–80 мс в среднем (рис. 5).

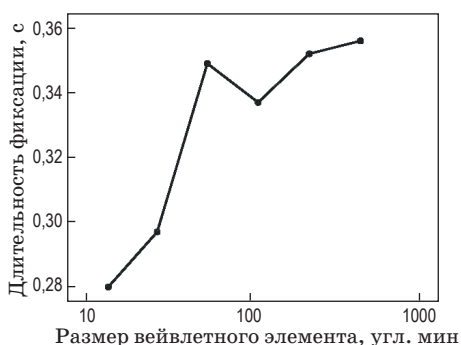


Рис. 4. Зависимость длительности фиксации от размера вейвлетного элемента.

Также были установлены пространственно-частотные характеристики наблюдаемых изображений, обеспечивающие присущий только человеку тип движения глаз — сканирование строк текста. Лишь при наличии и преобладании пространственных частот в диапазоне от 3 до 8 цикл/град возможна эффективная работа с текстом (рис. 6). Преобладание в спектре пространственных частот до 2,5–3 цикл/град и уменьшение доли высоких пространственных частот приводит к тому, что чувствительная к высоким пространственным частотам парвосистема не получает всей необходимой информации для эффективной работы. Но при этом, под влиянием инструкции, читатель продолжает сканирование структур, визуально напоминающих строки, сохраняя внешне сходный с чтением паттерн движений глаз.

Таким образом, оптимальное качество анализа зрительной информации при переходе от более простых условий чтения текста к более сложным обеспечивается с помощью постоянства длительности саккад и увеличения времени фиксаций. Относительно неизменная длительность саккады,

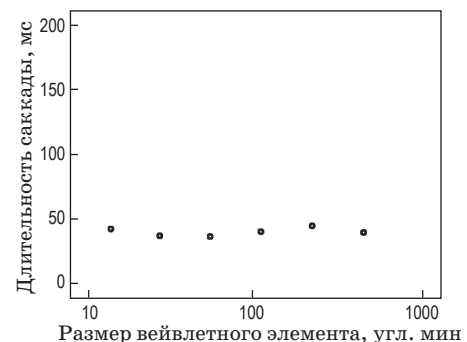


Рис. 5. Зависимость длительности саккад от размера вейвлетного элемента.

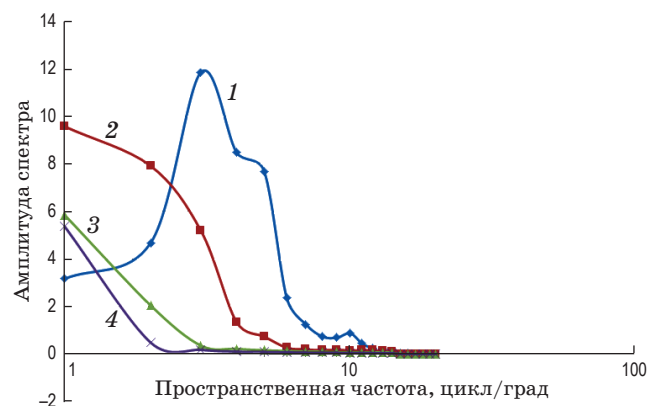


Рис. 6. Усредненные пространственно-частотные спектры фильтров уровней 1–4. Кривая 1 — уровень 1 — 8 пикселей (13,92 угл. мин), кривая 2 — уровень 2 — 16 пикселей (27,84 угл. мин), кривая 3 — уровень 3 — 32 пикселя (55,68 угл. мин), кривая 4 — уровень 4 — 64 пикселя (111,36 угл. мин).

по-видимому, может объясняться концепцией автоматии саккад, согласно которой саккады обусловлены деятельностью структур мозга, способных к ритмогенезу без внешних побудительных причин, по типу пейсмейкеров [25].

Опираясь на данные о необходимости наличия высоких пространственных частот для чтения, можно сделать предположение о том, что постепенное размытие текстов с помощью вейвлетной фильтрации мешает работе парвоцеллюлярной системы, но при этом увеличивает вклад магноцеллюлярной системы при чтении. С ростом размера вейвлетного элемента парвоцеллюлярная система получает недостаточно информации для эффективной работы — и в этой ситуации именно магноцеллюлярная система определяет стратегию движений глаз. Благодаря способности обрабатывать высокочастотную информацию, парвоцеллюлярный путь играет важную роль в идентификации букв [26, 27].

О роли магноцеллюлярной системы известно меньше. Одним из первых предположений было то, что она служит для подавления нейронной активности, накапливающейся во время фиксации парвоцеллюлярной системой. Это позволяет препятствовать нейронной активности, вызванной наложением одной фиксации на другую, производя, таким образом, объединяющую маскировку. Однако различные исследователи установили [28–32], что при саккадических движениях глаз подавляется актив-

ность магноцеллюлярной, а не парвоцеллюлярной системы [33]. За счёт подавления активности магносистемы происходит «сжатие» пространственной и временной информации, уменьшая информационную нагрузку и, следовательно, затраты ресурсов на обработку. Поэтому, исходя из полученных данных, можно предположить, что как при чтении обычного текста, так и размытого вейвлетной фильтрацией, именно магноцеллюлярная система определяет стратегию движений глаз при чтении.

Кроме того, соотнеся полученные нами данные о взаимодействии магно- и парвоканалов зрительной системы с данными о влиянии геометрии фовеа на окулomotorную активность [34] при чтении и опираясь на данные литературы об анатомии этих структур, можно также сделать заключение о том, что именно область парафовеа, являющаяся «входом» для низкочастотной информации, передаваемой магноканалом, «запускает» паттерн движений глаз, характерный для чтения в условиях дефицита высокочастотной информации. Таким образом, периферия поля зрения запускает бросок глаза вдоль строки на необходимый угол, а фовеа останавливает. Вначале броска происходит подавление активности парвосистемы, поэтому нет ощущения смазывания изображения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 годы (ГП-14, раздел 63).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Liversedge S.P., Drieghe D., Li X., Yan G., Bai X., Hyona J.* Universality in eye movements and reading: a trilingual investigation // *Cognition*. 2016. V. 147(3). P. 1–20.
2. *Rayner K., Duffy S.A.* Lexical complexity and fixation times in reading: Effects of word frequency, verb complexity, and lexical ambiguity // *Memory and Cognition*. 1986. V. 14(3). P. 191–201.
3. *Engbert R., Nuthmann A., Richter E.M., Kliegl R.* SWIFT: A dynamical model of saccade generation during reading // *Psychological Review*. 2005. V. 112(4). P. 777–813.
4. *Reichle E.D., Warren T., McConnell K.* Using E-Z Reader to model the effects of higher level language processing on eye movements during reading // *Psychonomic Bulletin & Review*. 2009. V. 16(1). P. 1–21.
5. *Reichle E.D., Rayner K., Pollatsek A.* The E-Z reader model of eye-movement control in reading: Comparisons to other models // *The Behavioral and Brain Sciences*. 2003. V. 26(4). P. 445–476.
6. *Pynte J., Kennedy A.* An influence over eye movements in reading exerted from beyond the level of the word: evidence from reading English and French // *Vision Research*. 2006. V. 46(22). P. 3786–3801.
7. *Kuperman V., Dambacher M., Nuthmann A., Kliegl R.* The effect of word position on eye-movements in sentence and paragraph reading // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2010. V. 63(9). P. 1838–1857.
8. *Balogh J., Zurif E., Prather P., Swinney D., Finkel L.* Gap-filling and end-of-sentence effects in real-time language processing: implications for modeling sentence comprehension in aphasia // *Brain and Language*. 1998. V. 182(61). P. 169–182.
9. *Rayner K., Kambe G., Duffy S.A.* The effect of clause wrap-up on eye movements during reading // *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2000. V. 53(4). P. 1061–1080.
10. *Rayner K., Sereno S.C., Morris R.K., Schmauder A.R., Clifton C.* Eye movements and on-line language comprehension processes // *Language and Cognitive Processes*. 1989. V. 4(3–4). P. 21–49.
11. *Hill R.L., Murray W.S.* Commas and spaces: effects of punctuation on eye movements and sentence parsing // *Reading as a Perceptual Process* / Ed. by Kennedy A., Radach R., Heller D., Pynte J. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2000. P. 565–589.

12. *Hirotani M., Frazier L., Rayner K.* Punctuation and intonation effects on clause and sentence wrap-up: Evidence from eye movements // *Journal of Memory and Language*. 2006. V. 54. P. 425–443.
13. *Warren T., White S.J., Reichle E.D.* Investigating the causes of wrap-up effects: Evidence from eye movements and E-Z Reader // *Cognition*. 2009. V. 111(1). P. 132–137.
14. *Radach R., Huestegge L., Reilly R.* The role of global top-down factors in local eye-movement control in reading // *Psychological Research*. 2008. V. 72(6). P. 675–688.
15. *Huestegge L., Bocianski D.* Effects of syntactic context on eye movements during reading // *Advances in Cognitive Psychology*. 2010. V. 6. P. 79–87.
16. *Al-Zanoon N., Dambacher M., Kuperman V.* Evidence for a global oculomotor program in reading // *Psychological Research*. 2017. V. 81(4). P. 863–877.
17. *Schmidt R.A.* A schema theory of discrete motor skill learning // *Psychological Review*. 1975. V. 82(4). P. 225–260.
18. *Sherwood D.E., Lee T.D.* Schema theory: critical review and implications for the role of cognition in a new theory of motor learning // *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 2003. P. 376–382.
19. *Schmidt R.A.* Motor schema theory after 27 years: Reflections and implications for a new theory // *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 2003. V. 74(4). P. 366–375.
20. *Глезер В.Д., Цуккерман И.И.* Информация и зрение. М.-Л.: Издательство Академии наук СССР, 1961. 184 с.
21. *Март Д.* Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.
22. *Kuffler S.W.* Discharge patterns and functional organization of mammalian retina // *Neurophysiology*. 1953. V. 16. P. 37–68.
23. *Burt P., Adelson E.* The Laplacian pyramid as a compact image code // *IEEE Transactions on Communications*. 1983. P. 532–549.
24. *Otero-Millan J., Troncoso X.G., Macknik S.L., Serrano-Pedraza I., Martinez-Conde S.* Saccades and microsaccades during visual fixation, exploration, and search: Foundations for a common saccadic generator // *Journal of Vision*. 2008. V. 8. P. 1–18.
25. *Филин В.А.* Автоматия саккад. М.: Изд-во МГУ, 2002. 240 с.
26. *Breitmeyer B.G.* The roles of sustained (P) and transient (M) channels in reading and reading disability // *Facets of dyslexia and its remediation* / Ed. by Right S.F., Groner R. North-Holland, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993. P. 13–31.
27. *Vidyasagar T.R.* A neuronal model of attentional spotlight: parietal guiding the temporal // *Brain Research Reviews*. 1999. V. 30. P. 66–76.
28. *Burr D.C., Morrone M.C., Ross J.* Selective suppression of the magnocellular visual pathway during saccadic eye movements // *Nature*. 1994. V. 371. P. 511–513.
29. *Burr D., Morrone M.C., Ross J.* Separate visual representations for perception and action revealed by saccadic eye movements // *Current Biology*. 2001. V. 11(10). P. 798–802.
30. *Burr D., Ross J., Binda P., Morrone M.C.* Saccades compress space, time and number // *Trends in Cognitive Science*. 2010. V. 14(12). P. 528–33.
31. *Uchikawa K., Sato M.* Saccadic suppression of achromatic and chromatic responses measured by increment-threshold spectral sensitivity // *Journal of the Optical Society of America. A. Optics, Image Science, and Vision*. 1995. V. 12. P. 661–666.
32. *Ross J., Burr D., Morrone C.* Suppression of the magnocellular pathway during saccades // *Behavioural Brain Research*. 1996. V. 80(1, 2). P. 1–8.
33. *Blakemore C., Campbell F.W.* Adaptation to spatial stimuli // *Journal of Physiology*. 1969. V. 200. P. 11–13.
34. *Ламминия А.М., Моисеенко Г.А., Вахрамеева О.А., Сухинин М.В., Шелепин Ю.Е.* Изучение связи характеристик движений глаз с геометрией фовеа // *Физиология человека*. 2016. Т. 42. № 4. С. 32–37.