

УДК 004.922, 004.932

О ВИЗУАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И РЕТИНОИДАХ ТРЕГУБА

А. М. Ковалев

*Учреждение Российской академии наук
Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
Учреждение Российской академии наук
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: amkov@ngs.ru*

Рассмотрено стереоскопическое визуальное пространство, построенное на основе трёхмерного ретиноида А. Трегуба. Показано, что для принятой модели глаза такое пространство соответствует ренессансной перспективе, наблюдаемой циклопическим глазом, причём дальность пропорциональна линейному параллаксу точек. Анализируются достоинства и недостатки предложенных моделей зрительного восприятия.

Ключевые слова: визуальное пространство, стереопсис, параллакс, автаптический нейрон, ретиноид.

Введение. Обычно человек воспринимает визуальную обстановку двумя глазами. Суммарное поле зрения ($>200^\circ$ по горизонту) примерно в 2 раза больше бинокулярного перекрытия ($\sim 120^\circ$), из которого по разным причинам исключается значительная часть сцены [1]. На рис. 1 показана центральная часть поля зрения левого (*a*) и правого (*b*) глаза. Характерно наличие большой площади слепых зон — это места выходов из сетчатки зрительных нервов (слепые пятна диаметром $4\text{--}6^\circ$) и участки, затенённые кровеносными сосудами (ангиоскотомы (диаметр крупных сосудов $\sim 1^\circ$)). Площадь слепых зон увеличивается вдвое при чисто бинокулярном стереоскопическом восприятии (*c*). Помимо этого из области бинокулярной обработки исключаются зоны окклюзии и автоокклюзии, когда видимый предмет загораживает свои детали и другие предметы, которые воспринимаются монокулярно. В моно—бинокулярном поле (*d*) учитываются поступления сигналов от каждого глаза отдельно или обоих вместе. Очевидно преимущество данного способа уменьшения слепых зон. Таким образом, при зрительном восприятии должно иметь место параллельное функционирование бинокулярных и монокулярных механизмов и непрерывное согласование их работы [1].

Другая проблема — неравномерная по полю разрешающая способность сетчатки (ретины). Наибольшее разрешение соответствует области фовеа, которая свободна от паутины сосудов и нервов (см. рис. 1, *d*). В фовеальной ямке диаметром $1,3^\circ$ разрешение может достигать 1–2 угл. мин, а стереоскопическое разрешение — 10–20 угл. с. При решении задач, требующих максимальной остроты зрения (распознавание образов, оценка дальности и размеров), фовеальная область сетчатки совмещается с проекцией исследуемого предмета путём вращения глаза. Движение происходит либо скачкообразно (саккады), либо в следящем режиме. Вращение зрительной оси и сетчатки приводит к двум важным следствиям. Во-первых, визуальное пространство (ВП) воспринимается сфероидальным [2–5]. Во-вторых, зрительной системе необходима кратковременная память для константного восприятия ВП при подвижной сетчатке [6]. В работах А. Трегуба по проблеме когнитивного зрения наличие такой памяти является основополагающим требованием [7, 8].

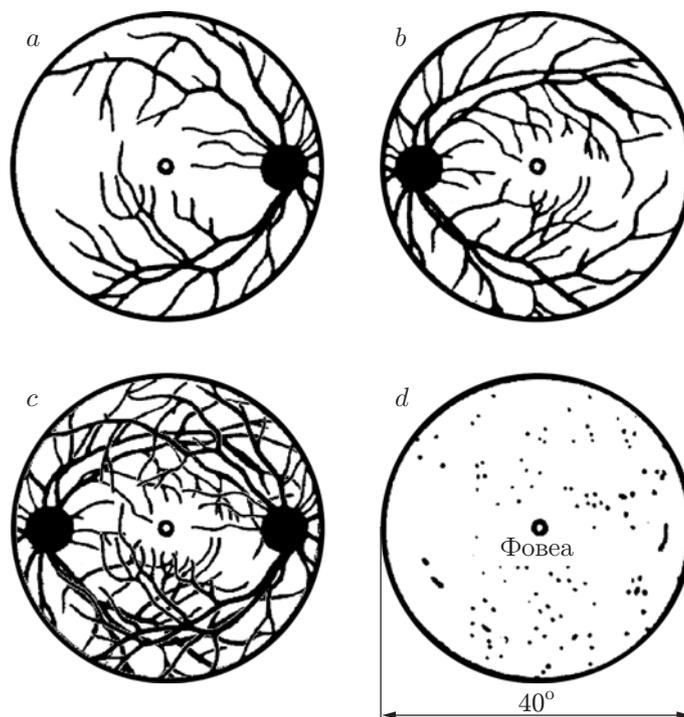


Рис. 1

Трегуб считает, что «в настоящее время мы обладаем достаточным знанием о физиологии нервных клеток и структуре мозга, чтобы продвинуться в теоретическом формулировании предполагаемого механизма мозга, основываясь на базовых концепциях познания». Базируясь на двух главных нейроструктурах (синаптических матрицах и ретиноидах), Трегуб развил серию моделей для наиболее важных функций мозга, таких как обучение и распознавание образов, семантическая обработка, мотивация и планирование. Ретиноидная система кратковременной памяти способна решать когнитивные задачи, в том числе трёхмерное представление ВП, анализ изображения, размещение и представление «себя» в среде, траекторий своего движения и селективное внимание.

Целью данной работы является анализ функций ретиноидов и определение геометрии и структуры ВП на трёхмерных ретиноидах Трегуба с учётом согласованного взаимодействия вышеупомянутых монокулярных и бинокулярных механизмов восприятия.

Двумерный ретиноид. Рассмотрим нейроструктуру ретиноидов. Базовым элементом кратковременной памяти является специальный тип автаптических нейронов (рис. 2), реализующих положительную рекуррентную обратную связь на собственный аксон. С помощью таких нейронов и промежуточных нейронов возбуждения/торможения создаются автаптические ячейки, которые образуют динамическую память, названную ретиноидом. Обычно ретиноид иннервируется ретинотопической проекцией аксонов [9, с. 128], передающих информацию от предыдущего этапа зрительного процесса — локального анализа фоторецепторного слоя или рецепторного анализа.

Схематически сечение двумерного ретиноида в горизонтальной плоскости показано на рис. 3. Полномасштабный ретиноид — это объёмная многослойная структура, где каждый слой является репликой изображённого сечения, снабжённой дополнительными межслойными соединениями. Ретиноид содержит пять регистров R1–R5, построенных на автаптических ячейках. Важное свойство ретиноида заключается в том, что он организован вокруг главной зрительной оси, создающей начало системы координат.

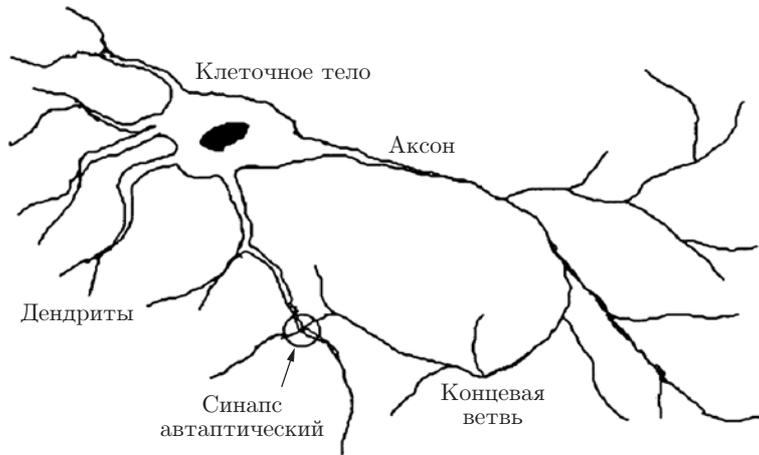


Рис. 2

Сдвиговой регистр R1 всегда подключён к фовеальной области сетчатки и получает центрированный мозаичный фрагмент сцены S_{ij} небольшого размера ($2-5^\circ$) высокого разрешения. Затем мозаика сдвигается вправо/влево (R/L) и вверх/вниз на величину, пропорциональную координатам текущего положения зрительной оси. Подразумевается, что информация о сдвиге поступает с верхнего уровня, управляющего глазодвигательной системой. После завершения сдвига в R1 фрагмент сцены S_{ij} передаётся в несдвиговой регистр R2, а изображение в R1 стирается. В R2 происходит сборка изображения реальной сцены, центрированной относительно главной оси.

Сдвиговой регистр R3 представляет гипотетическую окружающую сцену. Регистр получает реальную информацию от R2 и картинки, сформированные ретиноидным комплексом R4, названным синтезатором сцен. Источником этих картинок могут быть другие ретиноиды, долговременная память, проекции от мозаик в синаптических матрицах и т. д. Таким образом, в R3 может быть создано изображение сложной гипотетической сцены, полезной для отдельных приложений.

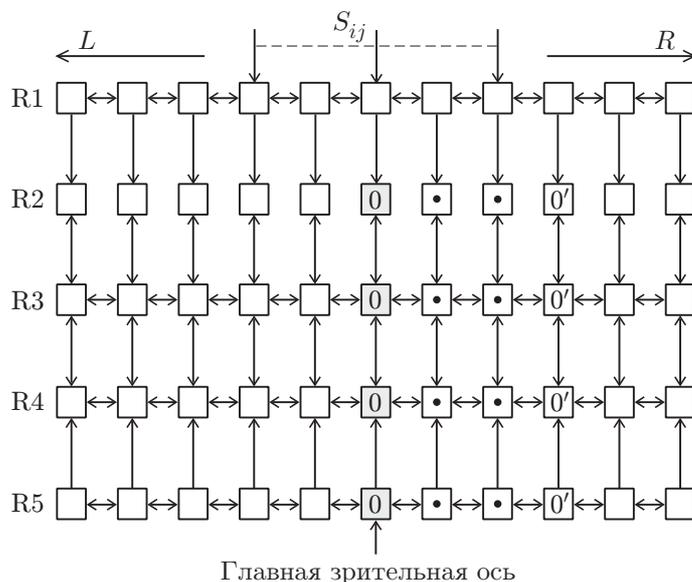


Рис. 3

Сдвиговой регистр R5 предназначен для хранения положения и траекторий «себя» в пространстве предметов. Уникальным кодом 0 (см. рис. 3) отмечается главная зрительная ось, кодом 0' — эвристическое положение «себя» и двумерная траектория, соединяющая 0 и 0' точками. Эта информация может передаваться в регистры R2–R4. С помощью R5 реализуется, например, функция селективного внимания, когда проекция предмета интереса из позиции 0' путём сдвигов вдоль заданной траектории перемещается на главную зрительную ось в позицию 0 и затем передаётся синаптической матрице для обучения или распознавания.

Достоинства и недостатки. Двумерный ретиноид Трегуба может хранить изображения на плоской или сферической поверхности в зависимости от вида проективного преобразования и принятой системы координат. Важно, что ретиноид не исключает сферодальности ВП.

Подключение двумерного ретиноида только к фовеальной области сетчатки ($2\text{--}5^\circ$) имеет и достоинства и недостатки. К достоинствам следует отнести высокую чёткость изображений и отсутствие влияний дисторсии сетчатки. К недостаткам — недопустимо большое время заполнения ретиноида. По Ярбусу [10, с. 100] продолжительность скачка на угол 5° равна $\sim 0,04$ с. Саккады настолько быстры, что занимают лишь 10 % видения [9, с. 172]. Таким образом, суммарное время скачка, фиксации взгляда и подготовки следующей саккады может составить 0,4 с. И это для поля, равного всего лишь 5° .

В работе Трегуба [7, с. 62] отмечалось, что сдвиг мозаики в регистре R1 происходит при движении не только глаз, но и глаз и головы вместе, т. е. при добавлении к сигналам глазодвигательной системы адекватного возбуждения вестибулярного аппарата. В функциональном отношении случай движения только глаз наблюдателя и случай движения глаз вместе с головой существенно отличаются, что подтверждено экспериментами с последовательными образами [6]. При движении только глаз не может произойти изменений в относительном расположении предметов среды и наблюдателя. И поэтому содержание кратковременной памяти должно сохраняться неизменным при всех вращениях глаз. При адекватном возбуждении вестибулярного аппарата, когда голова (и/или тело) приходит в движение, относительное расположение предметов и наблюдателя изменяется. Возникают новые окклюзии и параллаксы, происходит смещение и поворот главной зрительной оси. В этих условиях содержимое кратковременной памяти должно также измениться.

Трёхмерный ретиноид. Рассмотренные механизмы можно считать основными визуально-когнитивными процессами в двумерном пространстве. Далее показано, как на основе двух двумерных ретиноидов построен трёхмерный ретиноид для инициации стереопсиса и оценки дальности [7, с. 69].

Нейронная структура стереоскопического зрения представлена на рис. 4 в горизонтальной плоскости XZ . Ось X проходит через центры проекции левого L и правого R глаза. Ось Z направлена в глубину пространства. Сетчатки глаз представлены в виде плоских пластинок. Каждый малый квадрат в линейках, обозначенных « L -сетчатка» и « R -сетчатка», содержит двумерную матрицу фоторецепторов, связанных с ганглиозными клетками. Аксоны последних входят в состав зрительного нерва, который через слепое пятно сетчатки направляется в мозг. После рецепторного анализа изображение с сетчатки каждого глаза передаётся ретинотопически соответствующему двумерному L - или R -ретиноиду согласно вышеописанной процедуре.

В нижней части рис. 4 показаны ячейки ромбовидной формы, каждая из которых является кластером, иннервируемым ретинотопическими аксонами от левого и правого ретиноида. Задача кластера — найти взаимную корреляцию между микрокартинками, приходящими от левого и правого глаза. По этой причине ромбовидные ячейки названы «корреляционными кластерами». В трёхмерном ретиноиде определяется взаимная корреляция между картинками каждого малого квадрата L -ретиноида и каждого малого квад-

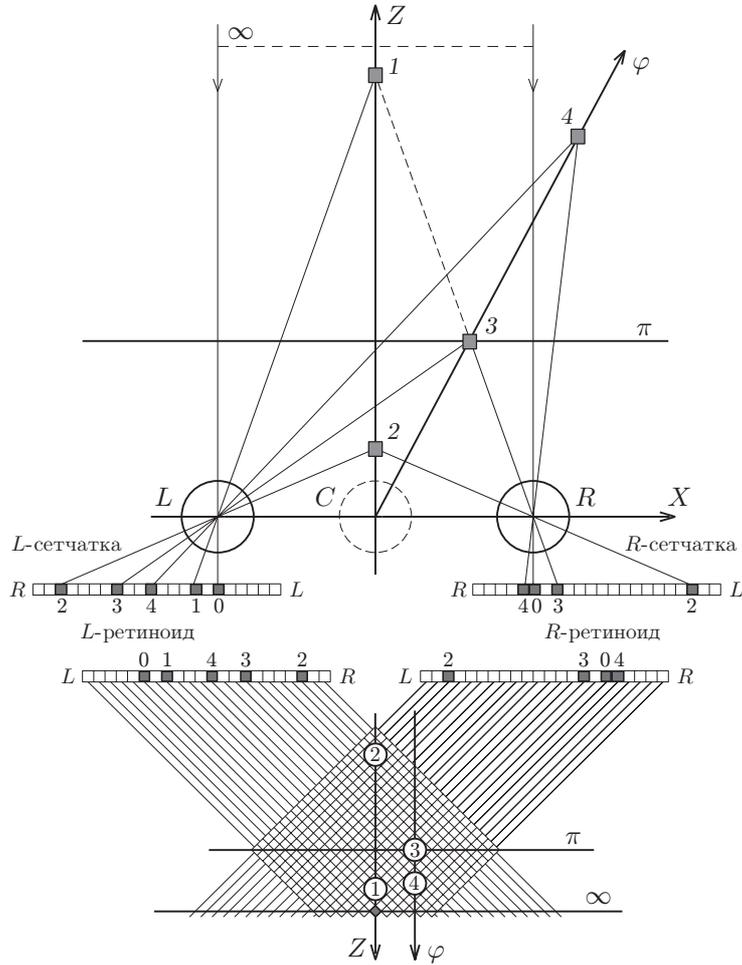


Рис. 4

рата *R*-ретиноида. Большой коэффициент корреляции (предметы 2, 3 и 4 на рис. 4) свидетельствует об успешной фузии (слиянии, сплаве) монокулярных изображений предметов в процессе стереопсиса. Предмет 1 воспринимается только монокулярно, поскольку попал в зону окклюзии, созданную предметом 3 (между 1 и 3 определяется малый коэффициент корреляции). Каждый вертикальный ряд кластеров дополнен нейронной схемой, убирающей дальние от наблюдателя предметы, например предмет 4 на линии взгляда φ .

Покажем, что вертикальные стринги, или ряды кластеров, представляют собой линии взгляда (Z, φ) циклопического глаза *C*, а горизонтальные — сечения фронтопараллельных плоскостей (π, ∞) . Пусть восприятию подлежит точка *P*, лежащая в плоскости π (рис. 5). Точка *P* задана в декартовой системе координат XYZ , начало которой совпадает с центром проекции циклопического глаза *C*. Ось *X* проходит через центры проекции левого *L* и правого *R* глаза, которые разнесены симметрично относительно *C* на расстояние глазной базы $2b$. Через ось *X* проходят плоскости визирования, или эпиполярные плоскости Гельмгольца. Модели глаз у Трегуба представлены в виде неподвижных объективов с плоскими фотоматрицами. Поэтому можно считать, что изображения на двумерных ретиноидах соответствуют изображениям на плоскости $z = f$, где f — фокусное расстояние объективов (оптика глаз одинакова). Найдём координаты проекции точки *P* на плоскость $z = f$:

$$x_R = \frac{(x - b)f}{z} + b; \quad x_L = \frac{(x + b)f}{z} - b; \quad x_C = x \frac{f}{z}; \quad y_R = y_L = y_C = y \frac{f}{z}. \quad (1)$$

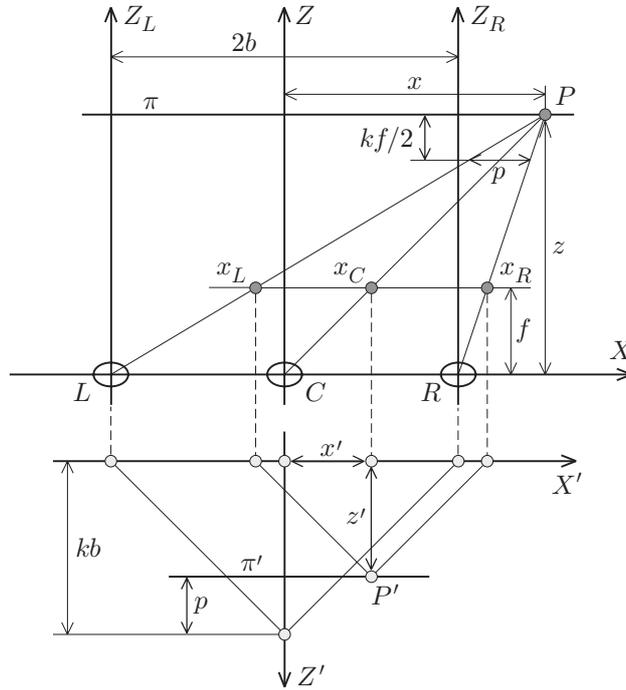


Рис. 5

Перейдём теперь к корреляционным кластерам, которые зададим в системе координат $X'Y'Z'$ (нижняя часть рис. 5). Определим координаты точки P' как

$$x' = x_C = \frac{x_R + x_L}{2} = x \frac{f}{z}; \quad y' = y_C = y \frac{f}{z};$$

$$z' = k \frac{x_R - x_L}{2} = k \left(b - \frac{bf}{z} \right) = kb - p, \tag{2}$$

где $p = kbf/z$ — линейный параллакс точки P ; k — отношение диагоналей ромбовидной ячейки корреляционного кластера.

Три важных замечания. Во-первых, поскольку линейный параллакс не зависит от положения точки P на плоскости π , а лишь от координаты z данной плоскости, величину p можно считать линейным параллаксом плоскости. Проекция π' плоскости π на рис. 5 удалена от предельной плоскости $z' = kb$ на величину параллакса p и соответствует горизонтальным стрингам корреляционных кластеров. Во-вторых, направление взгляда циклопического глаза на точку P' в пространстве $X'Y'Z'$ параллельно оси Z' и соответствует вертикальным стрингам. В-третьих, преобразование (2) относится к группе линейных перспектив и представляет ренессансную перспективу, вырожденность которой устраняется посредством учёта линейных параллаксов множества фронтопараллельных плоскостей. Однако при таком подходе нарушается психофизический закон Эммерта, поскольку координаты x' и y' получаются с помощью другой функции преобразования, чем координата z' [11].

Достоинства и недостатки. Главное достоинство трёхмерного ретиноида Трегуба заключено в механизме параллельного «нейрокомпьютинга» процесса стереопсиса. Взаимная корреляция между изображениями левого и правого глаза на уровне мозаик с высоким

разрешением выполняется всеми корреляционными кластерами трёхмерной матрицы одновременно.

Главный недостаток — принятая модель глаза и сетчатки в виде оптического объектива и плоской фотоматрицы. Это элементы скорее технического, а не когнитивного зрения. Игнорируется физиологическая оптика, нарушается психофизический закон Эммерта, не учитываются вращения глаз и теряется сфероидальность пространства [2].

Направление взгляда определяется через тангенсы углов типа $\operatorname{tg} \varphi = x/z$, а не через сами углы φ , которые могут быть углами поворота глаз. В результате для получения проективного преобразования приходится вводить величину фокусного расстояния f , одинаковую для обоих глаз. Если это не так, преобразования (1), (2) модифицируются и линейный параллакс p становится зависимым от положения точки P на плоскости π . Визуальное пространство деформируется.

К сожалению, в работе Трегуба только констатируется тот факт, что монокулярное зрение также объёмно, как и бинокулярное. Однако механизма учёта аккомодации глаз на уровне взаимодействия монокулярного и бинокулярного восприятий не предусмотрено.

Заключение. Восприятие пространства предметов является сложным процессом, который вовлекает монокулярные и бинокулярные механизмы. Сложность процесса во многом определяется наличием слепых зон поля зрения, возникающих по разным причинам. Чтобы избежать визуального дискомфорта, монокулярное и бинокулярное зрение должно быть согласовано.

В данной работе рассмотрена нейронная структура кратковременной памяти — двумерный и трёхмерный ретиноиды Трегуба. Память обеспечивает константность зрительного поля, в котором постоянные изменения сетчаточных изображений, вызываемые движениями глаз, не представлены в восприятии. Движения глаз лишь способствуют сокращению слепых зон и улучшают разрешающую способность поля. В двумерном ретиноиде реализуется размещение и представление личного «Я» в среде, представление траекторий своего движения и селективное внимание.

Показано, что геометрия стереоскопического визуального пространства, построенного трёхмерным ретиноидом Трегуба, соответствует проективным преобразованиям, характерным для группы линейных перспектив, а именно для ренессансной перспективы, которая по определению вырождена. Учёт линейных параллаксов множества фронтопараллельных плоскостей позволяет устранить вырожденность и оценить координаты дальности предметов.

Проведён анализ достоинств и недостатков предложенных моделей зрительного восприятия. Главным недостатком является применение неадекватной модели глаза и геометрии сетчатки. Отмечено недопустимо большое время заполнения ретиноидов, нарушение психофизического закона Эммерта, потеря сфероидальности пространства, отсутствие механизма учёта аккомодации глаз. Таким образом, нейронная модель ретиноида Трегуба (трёхмерная система кратковременной памяти в зрительном тракте) требует доработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рожкова Г. И.** Бинокулярное зрение // Физиология зрения /Под ред. А. Л. Бызова. М.: Наука, 1992. Гл. XI. С. 586–664.
2. **Ковалев А. М.** Виртуальное пространство в сферической перспективе // Оптический журнал. 1999. **66**, № 6. С. 127–135.
3. **Ковалев А. М.** Описание визуального пространства в моделях Клейна и Пуанкаре // Автометрия. 2006. **42**, № 4. С. 57–66.
4. **Ковалев А. М.** Об анизотропной модели визуального пространства // Автометрия. 2006. **42**, № 6. С. 53–62.

-
5. **Ковалев А. М.** О модели бинокулярного визуального пространства // Автометрия. 2008. **44**, № 4. С. 89–98.
 6. **Зенкин Г. М., Петров А. П.** О механизмах константности зрительного восприятия пространства // Сенсорные системы. Л.: Наука, 1979. С. 25–39.
 7. **Trehub А.** The cognitive brain. Cambridge: MIT Press, 1991. 329 p.
 8. **Trehub А.** Space, self, and the theater of consciousness // Consciousness and Cognition. 2007. **16**, N 2. P. 310–330.
 9. **Шиффман Х. Р.** Ощущение и восприятие. С.-Пб.: Питер, 2003. 924 с.
 10. **Ярбус А. Л.** Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 166 с.
 11. **Ковалев А. М.** Об одном способе изображения предметов и группе линейных перспектив // Автометрия. 2009. **45**, № 2. С. 36–44.

Поступила в редакцию 8 ноября 2010 г.
