

Нейропсихологические механизмы топологического и метрического принципов обработки пространственной информации

О.А. Гончаров, Н.Е. Ушакова

В статье предложена концепция двух принципов обработки пространственной информации: топологического и метрического. Показано, что топологический принцип обработки имеет широкое распространение на ранних этапах фило-, онто- и перцептогенеза. Разработана компьютерная методика соотношения топологических и метрических выборов. В нейропсихологическом исследовании выявлено, что соотношение топологического и метрического принципов основывается на взаимодействии височных и теменных отделов преимущественно в правом полушарии мозга, и характер этого взаимодействия претерпевает существенные изменения в онтогенезе.

***Ключевые слова:** пространственные представления, топологический и метрический принципы, методика топологических и метрических выборов, мозговая организация, функциональная асимметрия мозга.*

ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ. При формировании образов восприятия в той или иной степени искажается часть информации об объективных пространственных свойствах предметов. В зависимости от условий восприятия, уровня и глубины обработки одни свойства передаются достаточно точно, а в других допускаются определенные искажения. Применение геометрических моделей позволяет качественно и количественно выразить соотношение инвариантной и искаженной информации. В XIX веке немецкий математик Ф. Кляйн высказал идею, что разные степени пространственных преобразований представляют собой единый иерархический ряд, соответствующий основным разделам геометрии [22]. Наиболее общие пространственные свойства сохраняются при топологических преобразованиях, а дальнейший ряд, последовательно выражающий все более узкие свойства, представлен проективными, аффинными, преобразованиями подобия и евклидовыми преобразованиями.

Топологические свойства допускают любые пластические деформации, при которых сохраняется целостность фигуры. По-другому в топологии все объекты можно представить в виде множеств, состоящих из четырех классов точек: внутренних, пограничных, точек соединения и пересечения. Топологические свойства будут сохраняться при любых операциях, которые не допускают переход любой точки из одного класса в другой. Представим плоскую фигуру, нарисованную на абсолютно пластичной поверхности (например, на бесконечно тягучем резиновом листе). При совершении различных деформаций (растяжение, сжатие, сгибание, скручивание и т.п.) искажается большинство геометрических свойств данной фигуры: прямолинейность, параллельность и величина линий, величина углов. Однако при всех этих деформациях определенные свойства остаются неизменными: *близость, порядок, включенность и непрерывность*. Именно эти свойства являются топологическими, и они будут нарушаться только при разрывах между соседними точками (образование новых фигур) и наложении точек друг на друга (замыкание фигур). В топологическом отношении нет различий между отрезком и любой незамкнутой кривой. Однако замыкание кривой ведет к образованию нового топологического класса фигуры, поскольку при этом две

пограничные точки переходят в класс внутренних точек. Топология не допускает преобразование ломаной в замкнутую фигуру, а плоской фигуры в объемную. Например, топологически неразличимыми будут такие фигуры, как круг, овал, полусфера и любой многоугольник, но окружность, кольцо, сфера и шар будут относиться к другим классам фигур.

В проективных преобразованиях к топологическим свойствам добавляются некоторые более узкие свойства. Проективная геометрия анализирует принципы отображения различных фигур на плоскость. При проецировании фигуры на плоскость в зависимости от ее ориентации и угла наклона проекционной поверхности искажаются величины линий и углов, параллельные линии преобразуются в сходящиеся, но всегда сохраняется свойство *прямолинейности*. Аффинная геометрия к указанным свойствам добавляет свойство сохранения *параллельности линий*. Так, путем сдвига прямоугольник может быть преобразован в параллелограмм, при этом искажаются величины углов, но сохраняется параллельность противоположных сторон. В преобразованиях подобия изменяются линейные размеры фигур, но остаются неизменными *величины углов*, в результате чего сохраняется подобие общей формы. Евклидовы преобразования предполагают сохранение всех метрических свойств фигур, допускаются только повороты и симметричные отображения.

В психологии иерархический ряд геометрических преобразований преимущественно использовался для описания разных типов пространственных представлений. В частности, Ж. Пиаже на основе трех основных разделов геометрии выделил три типа пространственных представлений: топологические, проекционные и представления евклидова пространства (координатные) [14, 25]. В онтогенезе разные типы представлений развиваются неравномерно. Раньше других формируются самые общие топологические представления, затем проекционные и в последнюю очередь представления о системе координат. Например, в возрасте 3-4 лет ребенок на ощупь легко отличает замкнутую фигуру от открытой, предмет с отверстием внутри от сплошного. Однако он не способен различать между собой разные замкнутые фигуры (напр., треугольник от квадрата), где нужно учитывать простые метрические свойства: количество сторон, величину углов, направление и параллельность линий.

Топологические свойства имеют важное значение не только для пространственных представлений, но и для других когнитивных уровней, и далее мы будем подразумевать в целом *топологический принцип обработки пространственной информации (ТП ОПИ)*. ТП не допускает оценку никаких метрических свойств и основан на качественном описании пространственных характеристик объектов, к которым относятся выделение границ, замкнутых областей, разрывов, соединений и пересечений различных фигур. Ему следует противопоставить не отдельные типы геометрических преобразований, а в целом *метрический принцип (МП ОПИ)*. Метрическая обработка предполагает любое измерение пространственных характеристик, а также сравнение фигур с каким-нибудь эталоном. Под МП можно понимать измерение количества линий, величины углов, оценку параллельности, прямолинейности или оценку подобия общей формы фигур.



На первый взгляд, ТП ОПИ выглядит абстрактной геометрической моделью, не имеющей связи с реальными когнитивными процессами. Мы постараемся показать, что топологический принцип имеет самое широкое распространение в обработке зрительно-перцептивной информации, особенно на ранних этапах фило-, онто- и перцептогенеза, когда еще не подготовлен фундамент для более сложной и трудоемкой оценки метрических свойств, а также попытаемся раскрыть перцептивные и нейропсихологические механизмы, лежащие в его основе.

В филогенезе основа для МП ОПИ закладывается параллельно с дифференциацией сетчатки и формированием фовеального зрения, свойственного только высшим млекопитающим. Наша зрительная система устроена таким образом, что детальное описание метрических свойств возможно только тогда, когда изображение попадает в центральную ямку сетчатки. Логично предположить, что на периферии полей зрения обработка осуществляется на основе ТП. В этом легко убедиться, если рассматривать какой-нибудь объект (напр., кисть руки) краешком глаза. При этом можно фиксировать присутствие объекта, выделить его границы, но очень трудно сосчитать даже количество пальцев или описать направление линий.

В ранее проведенном эксперименте с помощью специально разработанной методики, которая будет описана ниже, мы проанализировали соотношение ТП и МП ОПИ при предъявлении зрительных стимулов в центральную и периферическую зону сетчатки глаза. Было показано, что при переходе от фовеа к зрительной периферии значительно увеличивается удельный вес обработки пространственной информации по топологическому принципу [7].

По мнению Пиаже, в онтогенезе топологические представления формируются раньше остальных [14, 25]. Наша позиция по этому вопросу более радикальна. Мы считаем, что ТП ОПИ не развивается в онтогенезе (т.е. не связан с приобретением опыта), а функционирует в автоматическом режиме на основе врожденной нервной организации. Если до определенного возраста не удастся выявить критерии топологической обработки, это скорее связано с периодом, необходимым для созревания соответствующих нервных механизмов или с недоступностью применения большинства экспериментальных методик в раннем возрасте.

В другом эксперименте мы сравнивали соотношение МП и ТП ОПИ в пяти возрастных группах: дошкольники, второй, четвертый, шестой классы с/ш и взрослые испытуемые (студенты). Оказалось, что наибольший удельный вес обработки по топологическому принципу имела в младших группах, а с возрастом постепенно усиливалась роль метрической обработки [7].

Топологическая обработка проявляется и в общей перцептивной организации на примере принципа «хорошей формы» (прегнантности), описанного гештальтпсихологами [13]. Например, фигура «» будет скорее восприниматься как равносторонний треугольник, а не как неправильный шестиугольник. Фигура «» больше напоминает круг, чем правильный восьмиугольник (особенно при удалении). Стремясь создать наиболее простое, математически непротиворечивое описание формы, восприятие в некоторой степени игнорирует мелкие различия в деталях объектов и сглаживает резкие сдвиги кривизны, что не противоречит принципу топологического подобия.

ТП ОПИ играет важную роль не только на ранних этапах филогенеза и онтогенеза, но и в каждом конкретном акте восприятия. В исследованиях Л.М. Веккера и Б.М. Ломова показано, что в условиях, затрудняющих восприятие (при слабом освещении, сокращении времени экспозиции или симультанировании образа), процесс построения перцептивного образа растягивается во времени, что позволяет наблюдать отдельные стадии перцептогенеза [1, 2, 8]. На ранней стадии испытуемый видит только аморфное пятно, т.е. отличают замкнутый контур от открытого. После этого наступает стадия «мерцания формы», где он в разных пробах может назвать одну и ту же фигуру кругом, квадратом или многоугольником. Все эти фигуры изоморфны по топологическим свойствам и могут быть преобразованы друг в друга путем

пластических деформаций. Ориентировка в метрических свойствах (направление, протяженность, параллельность линий, величина углов, пропорциональность деталей) проявляется на более поздних стадиях перцептогенеза.

Нами был проведен еще один эксперимент, в котором в качестве затрудняющего восприятие условия выступало сокращение экспозиции стимульного материала. Мы сравнили соотношение ТП и МП при экспозициях 50, 150 и 250 мс. Установлено, что влияние ТП сильнее всего проявляется на короткой экспозиции 50 мс, а при 150 и 250 мс повышался удельный вес метрической обработки, и различия на этих временных интервалах были несущественными [7].

В ряде недавних исследований показано, что ТП ОПИ играет важную роль в быстром узнавании и различении формы объектов. Китайский исследователь Л. Чен предъявлял испытуемым состоящий из однородных элементов паттерн, один из фрагментов которого был заполнен отличающимися элементами – нужно было как можно быстрее выделить этот фрагмент [18]. В четырех сериях целевые элементы отличались от остальных по топологическим, проекционным, аффинным или евклидовым свойствам. Для отличающихся в топологическом отношении элементов среднее время реакции оказалось наименьшим и составило 801 мс, а для остальных условий время реакции составило 968, 1465 и 1941 мс соответственно. В другом эксперименте испытуемым стереоскопически предъявляли объемную фигуру в виде ломаной, образованной четырьмя линейными сегментами [29]. Затем на экране появлялись еще две фигуры, одна из которых была идентична стандартной, а другая отличалась по евклидовым, аффинным или топологическим свойствам. Если фигуры различались по топологическим свойствам, опознание происходило гораздо быстрее и с минимальным количеством ошибок. Данные других исследований показывают, что на коротких экспозициях (около 30 мс) зрительная система человека в наибольшей степени чувствительна к таким топологическим признакам, как наличие отверстий в фигурах [31].

На топологических свойствах основано различение большинства букв алфавита, что оказывает непосредственное влияние на скорость чтения. Анализ величин углов, направлений и длин линий весьма долгий процесс, а выделение множества различительных точек, определяющих данную букву, протекает намного быстрее. При сравнении букв «О», «Г», «А», «Н», «Х», «У» сразу видно, что все они различаются в топологическом отношении: «О» состоит только из внутренних точек; «Г» помимо них содержит две пограничные точки; в «А» имеется две пограничные точки и две точки соединения; в состав «Н» входит четыре пограничных и две соединительные точки; «Х» имеет четыре пограничных и одну точку пересечения; «У» содержит три пограничные и одну соединительную точку. Различение букв «Н», «К», «И» требует больших затрат, поскольку они топологически подобны, также как буквы «Т» и «Ш», «Г» и «П». Вероятно, в письменном тексте четкие топологические различия затушевываются, и человек начинает ориентироваться по деталям и метрическим соотношениям каждой буквы, что приводит к значительному замедлению скорости чтения.

Среди других областей применения знаний о топологии можно выделить идентификацию лиц. В теории формирования прототипов показано, что при узнавании лиц мы ориентируемся не на конкретные эталоны или многочисленные детали, а запоминаем некую абстракцию ряда сходных образов часто встречаемых признаков, или *прототип* [27]. Прототип допускает определенные вариации в величинах признаков, внутри которых опознается индивидуальная принадлежность лица, но при этом возникают трудности различения малознакомых лиц со средней степенью

выраженности большинства признаков («обычная, ничем не примечательная внешность»). Мы предполагаем, что прототип лиц и других сходных объектов создается не механизмом абстрагирования или статистического усреднения часто встречаемых признаков, а определяется некоторым диапазоном вариаций, внутри которого сохраняется топологическое подобие множества признаков и паттерна в целом. Например, когда мы отмечаем, что человек похудел или пополнел лицом, подразумеваются деформации метрических соотношений между всеми деталями лица, но основные топологические свойства (близость и порядок) при этом не нарушаются, благодаря чему сохраняется скорость идентификации данного лица [29]. Если же определенный человек нам кого-то напоминает, предполагается топологическое сходство основных признаков двух лиц, и мы переходим к продолжительному, слегка мучительному сравнению метрических свойств множества деталей. Помимо прототипов на лица и формы других объектов некоторые авторы выдвинули концепцию пространственных прототипов [23, 26]. Вероятно, оценка местоположения объектов с их использованием также базируется на топологическом принципе. Топологические представления играют важную роль в структуре когнитивных карт, не только человека, но и крыс [17, 21].

Еще одним примером процесса, основанного на топологическом принципе, является узнавание символической информации. Предполагается, что в символе сохраняются некоторые черты сходства с прообразом. Наиболее показательны в этом отношении пиктограммы и символические рисунки. Например, то, что рисунок «☺» нами однозначно воспринимается как лицо, можно объяснить выделением основных топологических признаков. Как показано выше, у детей топологические представления в системе пространственных представлений имеют гораздо больший удельный вес, чем у взрослых. Исходя из этого, можно, по-новому, взглянуть на проблему «схематизма» детского рисунка. Предположение о том, что в рисовании ребенок совершает операции обобщения и схематизации, мало соответствует реальным процессам психического развития. Ему вполне достаточно для понимания опираться на топологическое сходство рисунка с изображаемым предметом. Анализируя рисунки 3-5-летних детей, Дж. Уиллатс заключает, что в этом возрасте сходство рисунка с оригиналом передается преимущественно на основе топологических свойств близости, разделенности и включенности [30]. В связи с этим отпадает необходимость точной передачи пропорций и метрических свойств, для которых к тому же у детей еще не сформирован фундамент в системе пространственных представлений и конструктивные навыки.

* * *

В данной статье мы поставили цель (насколько это возможно) *осветить нейropsихологические механизмы топологического и метрического принципов обработки пространственной информации.*

В этом аспекте одно из вероятных предположений связано с тем, что ТП должен каким-то образом основываться на ретинопической организации зрительных структур мозга. Так, при проецировании сетчаточного изображения в вышележащие структуры воссоздается в некотором отношении пространственный паттерн возбуждения нервных клеток. При этом искажаются все метрические свойства, но сохраняется пространственная близость и упорядоченность возбужденных точек. Поскольку ретинопическая организация наиболее упорядочена в стриарной коре (17-е поле), можно предположить, что с этой областью связано функционирование ТП ОПИ.

Однако имеющиеся нейрофизиологические данные заставляют отказаться от этого предположения. Именно в стриарной коре были впервые обнаружены специализированные нейроны-детекторы зрительных признаков. Такие нейроны реагируют на линии определенной ориентации и длины, величины углов [4, 13, 15]. Все это можно рассматривать как первичные признаки метрической обработки информации. К тому же в 17-ом зрительном поле наиболее развернута проекция фовеальной области сетчатки. Ранее было показано, что возможность оценки метрических свойств обеспечивается центральным зрением. На основе этого мы предполагаем, что в первичной зрительной коре закладывается первичная основа для МП ОПИ.

Возможно, фундамент для более древней, не связанной с фовеальным зрением обработки информации по топологическим свойствам заложен на нижележащих уровнях зрительной системы. В филогенезе дифференциация сетчатки и фовеальное зрение свойственны только высшим млекопитающим. Поскольку у низших позвоночных фовеа еще не дифференцирована, вероятно, их зрительная система обрабатывает пространственную информацию только по топологическим свойствам. У низших позвоночных также не развит молодой геникуло-стриарный зрительный тракт, и вся зрительная информация в мозг поступает по древнему тракту в средний мозг. У высших млекопитающих и человека детальная информация с фовеа поступает по молодому пути в первичную зрительную кору, но древний тракт также имеет корковое представительство в обход 17-го поля во вторичных зрительных зонах. На основе этого можно предположить, что пространственная информация о топологических свойствах преимущественно передается по древнему тракту и обрабатывается во вторичных и третичных корковых полях, т.е. в нижнетеменной и нижневисочной коре [13, 21, 28, 33]. Конечно, это предположение можно проверить только в специально организованных нейрофизиологических экспериментах, но оно имеет значение для понимания нейропсихологических механизмов ОПИ.

Можно ли связать два принципа ОПИ с функционированием определенных зон мозга? Учитывая принцип системной динамической локализации функций [9], можно предположить, что в столь сложном процессе принимает участие целая констелляция различных мозговых структур, но мы постараемся выделить те из них, которые вносят наибольший вклад. Наиболее распространенной является точка зрения о том, что ведущую роль в зрительно-пространственных функциях играют нижнетеменные отделы коры. Так, М. Мишкин и соавт. выделили два пути (системы) обработки зрительной информации: система «где?» и система «что?» [24]. Первая отвечает за обработку информации о пространственных свойствах, и ее субстратом является затылочно-теменной корковый путь. Система «что?» отвечает за предметное зрение и локализуется в затылочно-височном пути. Не так давно эта концепция подверглась пересмотру. В частности, М. Гудейл и Д. Милнер утверждают, что и пространственная, и предметная информация обрабатывается в обоих зрительных путях, а различие между ними заключается в характере стоящих перед субъектом задач. Они выделили две системы зрения: «зрение для действия» и «зрение для восприятия» [19, 20]. Первая система выполняет функцию непосредственного зрительного контроля двигательной активности в режиме реального времени, а вторая играет основную роль в опознании и вербализации перцептивных образов.

Разделение зрительных функций на две системы обработки информации нашло отражение в работах других авторов. Так, В.Д. Глезер выделяет два базисных механизма зрения: описание пространственных соотношений и инвариантное опознание формы [4]. Б.М. Величковский разделяет системы фокального и амбьентного

зрения [3]. Е.А. Сергиенко в системе «репрезентация – восприятие – действие» выделяет две подсистемы: перцептивный контроль действия и опознание объектов [11].

На основе этих данных нами разработана концепция двух перцептивных механизмов обработки пространственной информации: эгоцентрическое и концептуальное восприятие [5]. Эгоцентрическое восприятие описывает пространственные свойства по отношению к позиции наблюдателя в абсолютных величинах движений собственного тела и имеет непосредственные выходы на моторную систему по специализированным нервным каналам. Это механизм рано созревает в онтогенезе, и его субстратом являются нижнетеменные отделы новой коры. В концептуальном восприятии оценка расстояний, ориентации и размеров объектов производится по отношению к независимой от точки зрения абстрактной системе координат в относительных единицах внешних метрических шкал. Концептуальное восприятие развивается достаточно поздно на основе приобретенного опыта, и его субстратом являются нижневисочные отделы коры. Использование любого рода метрических шкал для оценки пространственных свойств опосредуется вспомогательными объектами и требует определенной вербализации пространственных свойств. Мы считаем, за МП ОПИ отвечает концептуальное восприятие, а за ТП – эгоцентрическое.

Это предположение находит косвенное подтверждение в нейропсихологических исследованиях. Так, при поражении нижнетеменных отделов довольно часто имеет место конструктивная апраксия, характерным симптомом которой является грубый распад изобразительной деятельности [10, 12]. В рисунках таких больных отдельные детали могут изображаться верно, но страдает их пространственное взаиморасположение. Например, они могут помещать уши внутри контура лица, а глаза и нос выносить за его пределы, в других случаях они накладывают друг на друга пространственно разделенные детали. Можно сказать, у этих больных нарушается топологическое единство изображений, что, возможно, является следствием распада топологических пространственных свойств перцептивных образов. Следует отметить, что подобные нарушения изобразительной деятельности преимущественно наблюдаются при поражении теменных отделов правого полушария [9, 10]. В норме ТП и МП ОПИ дополняют друг друга, но при поражении определенных зон мозга это соотношение будет нарушаться. Можно предположить, что при поражении теменных отделов должна снизиться доля обработки пространственной информации по ТП и повыситься по МП. Соответственно поражение височных отделов должно привести к противоположным эффектам. При этом согласно принципу динамической локализации психических функций, следует учитывать, что в онтогенезе мозговая организация двух принципов ОПИ может подвергаться качественным изменениям.

Таким образом, нам предстоит изучить мозговую организацию двух принципов обработки пространственной информации. Для этого специально было организовано нейропсихологическое исследование взрослых и детей с локальными поражениями различных отделов мозга. Выбор был сделан на поражении теменных и височных корковых отделов, поскольку именно они вносят наибольший вклад в обработку пространственной информации. Параллельно появляется возможность изучить межполушарную асимметрию в соотношении этих двух принципов.

МЕТОДИКА И ПРОЦЕДУРА ИССЛЕДОВАНИЯ. Исследование роли ТП в ОПИ сталкивается с проблемой выбора адекватного метода. Ж. Пиаже и другие исследователи для изучения топологических представлений применяли достаточно простые методики, чувствительные только для маленьких детей [14, 16, 25]. Среди них

можно назвать сравнение на ощупь замкнутых и открытых фигур, копирование последовательности цветных фигур в прямом и обратном порядке, определение последовательности цветных шариков при их вращении в трубке и т.п. Предполагается, что взрослые испытуемые не должны допускать ошибок при выполнении этих заданий.

В связи с этим мы разработали новый методический подход, который состоит в противопоставлении МП и ТП. Иерархический ряд геометрических преобразований предполагает сохранение более общих свойств в частных пространственных преобразованиях. Например, все топологические свойства должны сохраняться при аффинных трансформациях. Противопоставив два принципа обработки для экспериментального удобства, мы сознательно отошли от этого правила.

Процедура данного подхода предполагает сначала предъявление испытуемому какого-нибудь изображения-прототипа. Далее для опознания испытуемому предъявляют не сам прототип, а ряд частично преобразованных из него изображений. При этом одна половина изображений преобразуется из прототипа с сохранением отдельных метрических свойств, а другая – топологических. Затем испытуемого просят опознать ранее предъявлявшееся изображение или найти наиболее похожее на него. Лучшим способом для того, чтобы испытуемый не мог быть уверен, что прототип отсутствует в наборе для опознания и вынужден был останавливать выбор на одном из преобразованных изображений, является сокращение времени предъявления стимулов. Проведение серии испытаний с рядом изображений-прототипов позволяет создать биполярную шкалу метрических-топологических выборов. Данный подход позволяет изучать не отдельные стороны МП и ТП ОПИ, а только их соотношение. Мы допускаем, что эти принципы могут функционировать независимо друг от друга, но используемая биполярная шкала оставляет возможность исследования только реципрокных отношений между ними: чем сильнее выражен один принцип, тем слабее проявляется другой. Количество баллов по данной шкале будет служить показателем соотношения ТП и МП при различных экспериментальных условиях.

На основе данного подхода с помощью специальной компьютерной программы «Visual Illusion 2: Перспектива» [6] мы разработали *методику соотношения топологических и метрических выборов (ТВ и МВ)*. В процедуре всей серии исследований использовался ноутбук со стандартным экраном с диагональю 15,4". Методика состоит из 20 испытаний, в каждом предъявляется одно из 20 изображений-прототипов. Экспозиция стимулов устанавливается в соответствии с задачей исследования. Непосредственно вслед за прототипом на экран подается маскирующее изображение, чтобы пресечь возможность сканирования испытуемым послеобраза на сетчатке глаза. После этого на экране появляются шесть изображений в виде таблицы 3×2. Испытуемому дается инструкция выбрать предъявлявшееся ранее изображение или наиболее похожее на него. Среди этого набора три изображения преобразованы из прототипа по МП, а другие три – по ТП. За выбор топологически преобразованного изображения начисляется 1 балл, а метрически – 0 баллов. Соответственно максимальное количество баллов составляет 20. Чем больше баллов набирает испытуемый по данной шкале, тем сильнее у него выражен ТП ОПИ.

Все рисунки были созданы в графическом редакторе «CorelDRAW», а затем преобразованы в растровые изображения. Они были построены из черных линий толщиной 0,7 мм, вписаны в белый квадрат со стороной 50 мм и предъявлялись на монотонном светло-сером фоне экрана. При создании преобразованных по МП изображений мы старались ориентироваться на их сходство с прототипом по общей форме, направлению линий и величине углов. Отличие от прототипа заключалось во внедрении дополнительных элементов, разрывах или соединениях линий. В

преобразованных по ТП изображениях нарушалось сходство общей формы с прототипом. Например, прямые линии могли заменяться на ломаные, круги – на шестиугольники, квадраты, или ромбы. Использовались также другие пластические деформации, но мы строго следили за сохранением общего количества элементов, не допускали разрывов, соединений и наложений линий. Несколько примеров изображений-прототипов и их преобразований можно увидеть на рис.1. В качестве маскирующего изображения использовалась решетка размером 50×50 мм, состоящая из вертикальных и горизонтальных черных линий толщиной 0,7 мм на белом фоне.

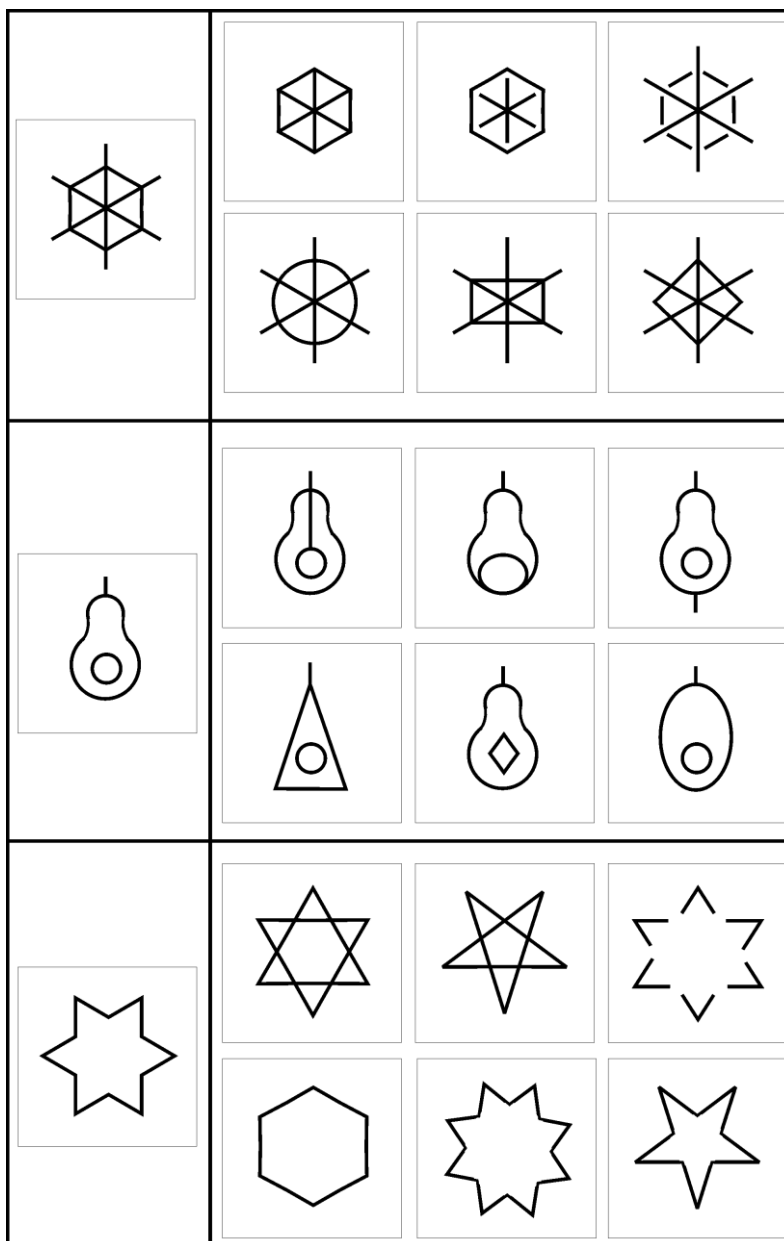


Рисунок 1. Примеры изображений, предъявлявшихся в методике на соотношение ТВ и МВ. Слева три изображения-прототипа: «снежинка», «груша» и «звезда», а справа преобразованные изображения. В верхних рядах сохраняется сходство с прототипом по метрическим свойствам, а в нижних – по топологическим

Для определения оптимального диапазона экспозиции стимулов предварительно была проведена серия калибровочных испытаний на здоровых испытуемых с шагом экспозиции 25 мс, в которых изображение-прототип присутствовало в наборе для опознания. При экспозиции 50 мс испытуемые не были уверены в правильном опознании эталона и допускали ошибки примерно в 20% случаев, т.е. данная экспозиция находится в околопороговой зоне опознания. При экспозиции 250 мс ошибки практически отсутствовали. Таким образом, в окончательной серии мы остановились на предъявлении стимульного материала при трех условиях экспозиции: 50, 150 и 250 мс. При каждом условии использовался один и тот же набор изображений. Чтобы избежать запоминания ответов и их использования в последующих условиях, при каждой экспозиции изменялся порядок предъявления изображений, а паузы между отдельными условиями заполнялись интерферирующим заданием. На выполнение каждого условия испытуемый тратил не более пяти минут. Для предотвращения эффектов последовательности предъявления трех условий экспозиции применялась схема полного кросс-индивидуального уравнивания, т.е. каждому испытуемому предъявлялся только один из шести возможных порядков предъявления трех условий.

В нейропсихологическом исследовании анализировалось влияние сразу трех межгрупповых и одного внутригруппового факторов: 1) очаг поражения (теменные и височные корковые поражения), 2) латерализация поражения (левое и правое полушарие), 3) возраст больных (младшая, старшая группы детей и взрослые), 4) экспозиция стимулов (50, 150 и 250 мс). Учитывая сложный характер межфакторного взаимодействия, выдвижение направленных гипотез в данном исследовании выглядит весьма затруднительным. В качестве ориентировочной гипотезы мы предположили, что *основное участие в ТП ОПИ принимают теменные отделы коры, однако их участие может модифицироваться под влиянием факторов возраста и латерализации поражения.*

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью программы «Statistica 8» методом дисперсионного анализа. В зависимости от стоящих задач применялись различные техники данного метода: однофакторный, многофакторный, ДА с повторными измерениями, процедуры проверки однородности дисперсий и множественных парных сравнений средних (Post-Hoc анализ).

УЧАСТНИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ. Нейропсихологическое исследование проводилось на базе нейрохирургических отделений Коми республиканской и детской Коми республиканской больниц. Почти во всех случаях очаг поражения верифицировался с помощью магниторезонансной томографии, иногда с помощью компьютерной томографии. Врачи-нейрохирурги предоставляли подробную информацию по этиологии заболеваний, локализации и латерализации очага поражения, определяли оптимальное клиническое состояние больных для проведения обследования. Для исследования специально отбирались только больные с локальными поражениями теменных и височных отделов мозга. Всего приняли участие 82 человека, разбитые на три возрастные группы: 1) младшие дети (5-10 лет), 2) старшие дети (11-15 лет) и 3) взрослые больные. По характеру поражения у детей преобладали черепно-мозговые травмы (57%) и новообразования (43%). У взрослых этиология заболевания была представлена новообразованиями (48,6%), черепно-мозговыми травмами (37,9%) и сосудистыми нарушениями (13,5%). Данные о локализации и латерализации очага поражения всех больных приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Распределение больных по локализации и латерализации очага поражения в трех возрастных группах

Группы	Очаг поражения	Пораженное полушарие		всего
		правое	левое	
Младшие дети	висок	3	7	10
	темя	6	6	12
	всего	9	13	22
Старшие дети	висок	4	10	14
	темя	5	4	9
	всего	9	14	23
Взрослые больные	висок	11	7	18
	темя	8	11	19
	всего	19	18	37
Все больные		37	45	82

РЕЗУЛЬТАТЫ. Во всех экспериментах среднее число топологических выборов оказалось относительно небольшим, у отдельных испытуемых оно редко превышало значение 10 баллов. Скорее всего, это объясняется особенностями стимульного материала, сильно выраженными отличиями топологически преобразованных изображений от прототипов. Возможно, в дальнейшем нам следует доработать стимульный материал методики, чтобы повысить общую вероятность ТВ.

Некоторые больные с локальными поражениями мозга не смогли выполнить задание при экспозиции 50 мс, они просто не успевали что-либо увидеть. Это обстоятельство согласуется с данными о том, что гностические расстройства при мозговых поражениях часто проявляются только в сенсibilизированных пробах при сокращении времени экспозиции [10, 12]. В связи с этим общее количество испытуемых при разных условиях экспозиции получилось разным, но все равно этого количества оказалось достаточным для статистической обработки.

Сначала мы попытались обработать результаты разных групп больных детей и взрослых по отдельности, но в итоге получилась довольно запутанная картина. Гораздо более интересные результаты получились после того, как дети были разбиты на две группы (младшую и старшую) и одновременно было учтено влияние трех межгрупповых факторов (возраст, локализация и латерализация очага поражения) и одного внутригруппового (время экспозиции). Описание всех возможных эффектов взаимодействия четырех факторов заняло бы слишком много места, поэтому остановимся только на самых интересных результатах.

Сначала приведем данные о влиянии экспозиции по всем больным с локальными поражениями мозга. Среднее число ТВ при экспозиции 50 мс составило $7,12 \pm 0,36$, при 150 мс – $6,03 \pm 0,40$, а при 250 мс – $6,18 \pm 0,43$. Результат при 50 мс заметно отличается от других значений экспозиции, а между 150 и 250 мс различий почти нет. Влияние времени экспозиции на соотношение ТВ и МВ соответствует уровню статистической тенденции ($F(2; 110) = 2,75$; $p = 0,069$). В целом эти результаты подтверждают вывод о том, что при увеличении экспозиции возрастает роль метрической обработки.

Далее была проанализирована динамика результатов по трем возрастным группам больных. В младшей группе детей среднее число ТВ по всем значениям экспозиции составило $7,48 \pm 0,51$, в старшей группе – $5,75 \pm 0,51$, а у взрослых больных – $6,09 \pm 0,37$.

Влияние фактора возраста на соотношение ТВ и МВ оказалось значимым ($F(2; 55) = 3,36; p = 0,0422$). При этом результаты младшей группы значимо отличались от старшей и взрослой групп, а между последними различий почти нет. Анализ возрастной динамики отдельно по экспозициям оказался значимым только при экспозиции 150 мс ($F(2; 76) = 3,68; p = 0,030$). По нашему мнению, отсутствие возрастной динамики при экспозиции 50 мс объясняется тем, что этого времени многим больным недостаточно для анализа изображений, и при этом условии повышается вероятность случайных ответов. В целом эти данные подтверждают возрастную динамику ТВ, выявленную в ранее проведенных исследованиях [7].

На следующем этапе мы проанализировали влияние теменных и височных поражений мозга на соотношение ТВ и МВ без учета влияния трех других факторов (возраста, латерализации и экспозиции). Среднее число ТВ при теменных поражениях составило $7,0 \pm 0,41$ балла, а при височных – $5,88 \pm 0,35$. Эти результаты статистически значимо различаются ($F(1; 55) = 4,29; p = 0,0432$). То обстоятельство, что при теменных поражениях число ТВ оказалось больше, чем при височных, противоречит первоначальной гипотезе. В связи с этим мы решили разобрать эти результаты с учетом влияния других факторов. Взаимодействие факторов возраста больных и локализации очага поражения оказалось значимым ($F(2; 55) = 4,66; p = 0,0135$). Получилась очень интересная картина пересекающегося взаимодействия двух факторов, которая представлена графиком на рис. 2. На этом графике видно, что в младшей группе детей при теменных поражениях число ТВ значительно больше, чем при височных. В старшей группе детей эти различия не столь выражены, а у взрослых больных наблюдается обратная картина – при височных поражениях число ТВ уже больше, чем при теменных.

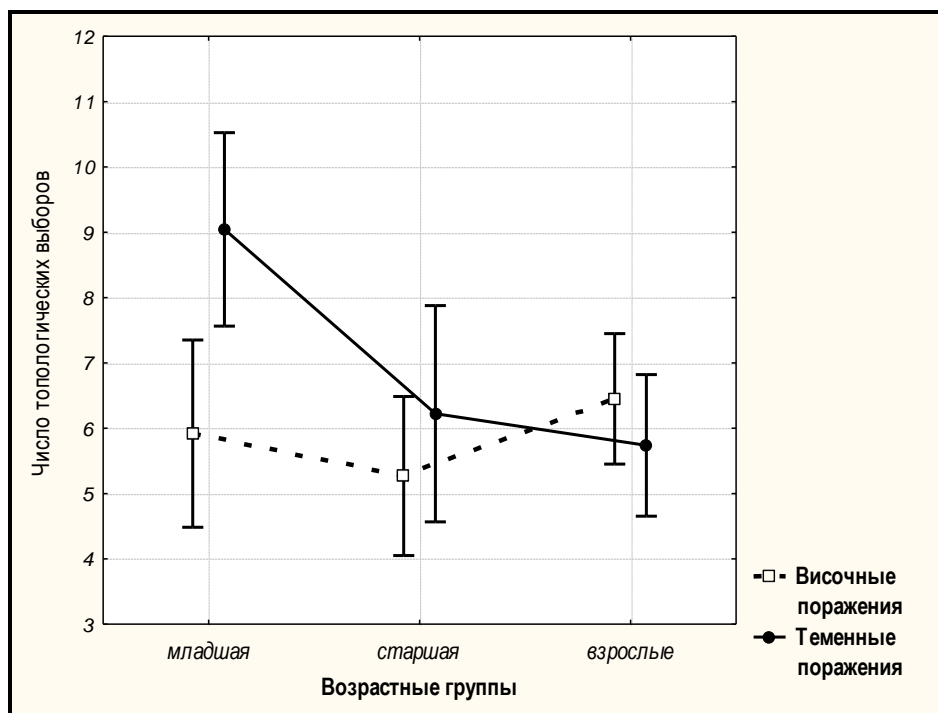


Рисунок 2. График числа топологических выборов при теменных и височных поражениях мозга в трех возрастных группах больных с ЛПМ

Далее мы учли влияние сразу трех факторов: возраст, локализация и экспозиция. Взаимодействие этих факторов оказалось незначимым, но общая картина трехфакторного анализа очень показательна и удобна для интерпретации (см. график на рис. 3).

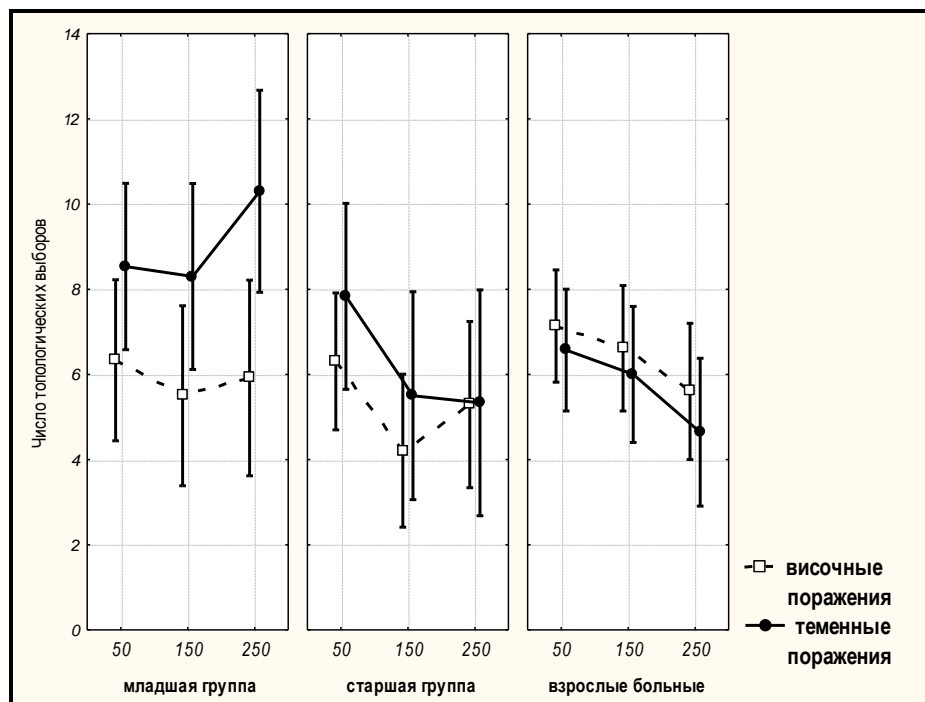


Рисунок 3. График числа ТВ при темных и височных поражениях у больных трех возрастных групп при трех значениях экспозиции

На этом графике видно, что при всех значениях экспозиции в младшей группе больных детей число ТВ при темных поражениях значительно больше, чем при височных. В группе взрослых больных наблюдается обратная картина: при всех экспозициях число ТВ больше при височных поражениях. В старшей группе при экспозициях 50 и 150 мс результаты получились как в младшей группе, а при 250 мс различий нет.

На заключительном этапе мы проанализировали влияние фактора латерализации поражения. Среднее число ТВ при поражениях правого полушария составило $6,61 \pm 0,41$, а при поражениях левого – $6,27 \pm 0,35$ балла. Различия между этими результатами не значимы. Также не значимыми оказались различия числа ТВ при поражении правого и левого полушарий внутри каждой возрастной группы и отдельно по каждому значению экспозиции. И только взаимодействие факторов латерализации и локализации очага поражения оказалось статистически значимым ($F(1; 55) = 7,22$; $p = 0,0095$). График взаимодействия этих двух факторов представлен на рис. 4. (Сходная картина взаимодействия факторов локализации и латерализации наблюдалась отдельно в младшей и старшей группах больных детей на уровне статистической тенденции). На графике видно, что при левополушарных поражениях височных и теменных отделов различий практически нет. Однако в правом полушарии при темных поражениях резко увеличивается число ТВ, а при височных поражениях оно уменьшается.

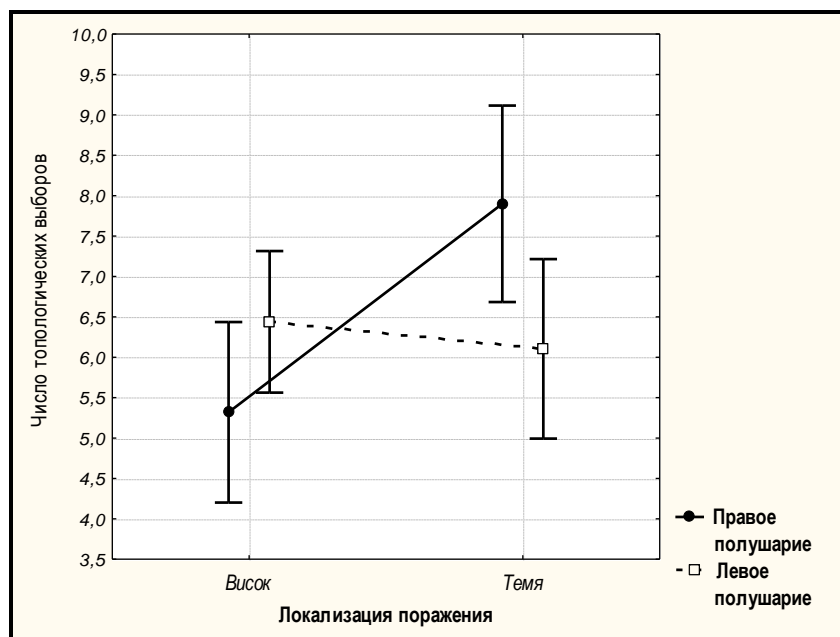


Рисунок 4. График числа топологических выборов у больных с теменными и височными поражениями правого и левого полушарий мозга

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. В целом методика соотношения ТВ и МВ показала высокую эффективность для выявления способов ОПИ как в ранее проведенных экспериментах, так и нейропсихологическом исследовании. Однако вариабельность ответов испытуемых была довольно большой, и в дальнейших исследованиях для повышения надежности данную методику следует немного скорректировать. В частности, можно увеличить число испытаний (создать дополнительные изображения-прототипы), ввести количественные критерии отличий преобразованных изображений от прототипов, ввести повторные пробы с одинаковыми изображениями в начале и конце каждой серии и т.п.

Часть результатов нейропсихологического исследования еще раз подтвердила выводы предыдущих исследований: роль МП ОПИ повышается при увеличении времени экспозиции и возраста испытуемых [7]. Однако самым интересным фактом стало *возрастное изменение вклада теменных и височных отделов мозга в соотношение ТП и МП ОПИ*. Изначально мы предполагали, что ТП преимущественно связан с функционированием нижнетеменных отделов, а МП – нижневисочных. Соответственно при поражении теменной коры должна повыситься роль метрической обработки, а при поражении височной – топологической. Однако такая картина наблюдалась только у взрослых больных, у детей преобладала обратная закономерность. По мнению В.Д. Глезера, нейрофизиологические механизмы нижневисочной коры созревают достаточно поздно (примерно к 13-14 годам) [4]. Эти данные позволяют объяснить то, что по мере взросления основное участие в МП переходит к височным отделам, а при их поражении у взрослых увеличивается доля ТВ. Однако при этом возникает другой вопрос: почему изначально у детей при височных поражениях повышается доля МВ? На данном этапе этот вопрос остается открытым и требует дополнительного изучения.

По результатам проведенного исследования нельзя сказать, что обработка пространственной информации по ТП или МП связана с функционированием какого-

нибудь отдельного участка мозга. Скорее всего, соотношение этих двух принципов основывается на динамическом взаимодействии ряда мозговых зон (в частности, височной и теменной коры). В дальнейшем представляется интересным выяснить роль других отделов мозга (напр., затылочных и премоторных) в этом процессе.

Следует также обратить внимание на межполушарные различия в двух принципах ОПИ. Очень часто в работах по функциональной асимметрии мозга исследователи идут по самому простому пути дихотомического деления функций на лево- и правополушарные. При этом практически игнорируются особенности внутривисочных взаимодействий мозговых структур, что нередко приводит к противоречивым результатам. Наше исследование показывает один из возможных путей преодоления подобных противоречий. Когда мы сравнили соотношение ТВ и МВ только при поражениях правого и левого полушарий никаких различий не было выявлено. Однако при одновременном учете факторов локализации и латерализации очага поражения получились очень интересные результаты. Только в правом полушарии при поражении височных и теменных отделов наблюдались значимые различия по числу ТВ, а в левом их не было. Таким образом, можно заключить, что в соотношении топологического и метрического принципов ОПИ ведущая роль отводится взаимодействию теменных и височных отделов в правом полушарии мозга.

ВЫВОДЫ

1) Мозговая организация топологического и метрического принципов обработки пространственной информации претерпевает существенные изменения в онтогенезе. У детей доля обработки информации по топологическим свойствам увеличивается при поражении теменных отделов, а у взрослых – при поражении височных отделов.

2) Ведущая роль в соотношении топологического и метрического принципов обработки пространственной информации отводится правополушарным механизмам взаимодействия теменной и височной коры.

Литература:

1. Веккер Л.М. Психические процессы (том 1). Л.: Изд-во ЛГУ, 1974.
2. Веккер Л.М., Бровар А.В., Владимирова Н.М., Михайлова И.А. О соотношении структурных и статистических характеристик образов восприятия разной степени константности // *Вопросы психологии*, 1971, № 1. С. 36-49.
3. Величковский Б.М. Когнитивная наука: основы психологии познания. М.: Смысл, 2006.
4. Глезер В.Д. Зрение и мышление (2-е изд.). СПб.: Наука, 1993.
5. Гончаров О.А. Восприятие пространства и перспективные построения. СПб.: СПбГУ, 2007.
6. Гончаров О.А., Емельянова Н.Е., Логинов И.Н. Компьютерная программа для экспериментально-психологических исследований восприятия пространства «Visual Illusion 2: Перспектива». М.: ВНИИЦ, 2007, № регистрации: 502007009943.
7. Гончаров О.А., Емельянова Н.Е., Тяповкин Ю.Н. Топологический и метрический принципы обработки пространственной информации: перцептивные и возрастные закономерности // *Психологический журнал*, 2011, т. 32, №1. С. 87-96.
8. Ломов Б.Ф. Человек и техника. М.: Сов. радио, 1966.
9. Лурия А.Р. Высшие корковые функции человека (3-е изд.). М.: Академ. проект, 2000.
10. Меерсон Я.А. Высшие зрительные функции. Л.: Наука, 1986.

11. Сергиенко Е.А. Раннее когнитивное развитие: новый взгляд. М.: ИП РАН, 2006.
12. Тонконогий И.М. Введение в клиническую нейропсихологию. Л.: Медицина, 1973.
13. Шиффман Х. Р. Ощущение и восприятие (5-е изд.). СПб.: Питер, 2003.
14. Флейвелл Дж. Генетическая психология Ж. Пиаже. М.: Просвещение, 1967.
15. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990.
16. Ченцов Н.Ю., Симерницкая Э.Г., Обухова Л.Ф. Нейропсихологический анализ нарушений пространственных представлений у детей и взрослых. // *Вестник МГУ*, сер. 14, 1980, № 3. С. 63-71.
17. Alvernhe A., Sargolini F., Poucet B. Rats build and update topological representations through exploration // *Animal Cognition*, 2012, vol. 15. P. 359-368.
18. Chen L. Topological perception: A challenge to computational approaches to vision // *Connectionism in Perspective* (Eds. R. Pfeifer et al.). Amsterdam: Elsevier, 1989. P. 317-329.
19. Goodale M.A., Humphrey G.K. The objects of action and perception // *Cognition*, 1998, vol. 67. P. 181-207.
20. Goodale M.A., Milner A.D. Sight unseen: an exploration of conscious and unconscious vision. Oxford: Oxford University Press, 2004.
21. Goodrich-Hunsaker N.J., Howard B.P., Hunsaker M.R., Kesner R.P. Human topological task adapted for rats: spatial information processes of the parietal cortex // *Neurobiology of Learning and Memory*, 2008, vol. 90, № 2. P. 389-394.
22. History of Topology (ed. I.M. James). Amsterdam: ELSEVIER B.V., 1999.
23. Huttenlocher J., Hedges L.V., Duncan S. Categories and particulars: Prototype effects in estimating spatial location // *Psychological Review*, 1991, vol. 98. P. 352-376.
24. Mishkin M., Ungerleider L.G., Masko K.A. Object vision and spatial vision: two cortical pathways // *Trends in Neurosciences*, 1983, vol. 6, № 10. P. 414-417.
25. Piaget J., Inhelder B. *The child's conception of space*. London: Routledge and Kegan Paul, 1956.
26. Plumert J.M., Hund A.M. The development of memory for location: What role do spatial prototypes play? // *Child Development*, 2001, vol. 72, № 2. P. 370-384.
27. Solso R.L., McCarthy J.E. Prototype formation of faces: a case of pseudomemory // *British Journal of Psychology*, 1981, vol. 72. P. 499-503.
28. Sun Y., Wang H. The Parietal Cortex in Sensemaking: The Dissociation of Multiple Types of Spatial Information // *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2013, vol. 2013, 14 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/152073>
29. Todd J.T., Chen L. & Norman J.F. On the relative salience of Euclidean, affine, and topological structure for 3-D form discrimination // *Perception*, 1998, vol. 27. P. 273-282.
30. Willats J. Art and representation. Princeton: Princeton University Press, 1997.
31. Zhang J., Zhu W., Ding X., Zhou Ch., Hu X., Ma Yu. Different masking effects on “hole” and “no-hole” figures // *Journal of Vision*, 2009, vol. 9, № 6. P. 1-14.
32. Zhou T., Zhang J., Chen L. Neural Correlation of “Global-first” Topological Perception: Anterior Temporal Lobe // *Brain Imaging and Behavior*, 2008, vol. 2. P. 309-317.

Поступила в редакцию: 02.07.2014 г.

Сведения об авторах

О.А. Гончаров – доктор психологических наук, профессор кафедры психологии Международного университета природы, общества и человека «Дубна».

E-mail: oleggoncharov@inbox.ru

Н.Е. Ушакова – кандидат психологических наук, директор института социальных технологий Сыктывкарского государственного университета.

E-mail: ashatana@mail.ru