

УДК 159.931, 612.8

Шелепин Ю.Е.^{а,б,в}, Борачук О.В.^б, Пронин С.В.^{а,в}, Хараузов А.К.^{а,в},
Васильев П.П.^а, Фокин В.А.^в

^аИнститут физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

^бСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^вНациональный университет информационных технологий механики и оптики
(Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия

^гВоенно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

Лицо и невербальные средства коммуникации¹

Face and nonverbal communication

Аннотация

Лицо человека всегда было предметом пристального интереса психологов, физиологов, врачей, художников, юристов и инженеров. Восприятие лица позволяет изучать механизмы как неосознанного, так и осознанного восприятия. Одним из важных направлений исследований в этой области является изучение восприятия мимических деформаций лица как одного из средств невербальной коммуникации. В работе рассмотрены психологические проблемы исследования механизмов восприятия мимики и изучение нейронных сетей от сетчатки до фронтальной коры, обеспечивающих это восприятие. Методы нейроиконики – науки о восприятии изображений – позволили целенаправленно осуществить цифровой синтез и обработку тестовых изображений лиц человека с различным выражением эмоций и положением головы. Проведен анализ откликов нейронных сетей головного мозга на эти стимулы методами функциональной магнитно-резонансной томографии. Отклики нейронных сетей также были изучены методами цифровой обработки изображений структур головного мозга, отвечающих на предъявляемые стимулы. Продемонстрированы механизмы, обеспечивающие распознавание врага от друга.

Ключевые слова: лицо, мимика, распознавание мимики, рецептивные поля, нейронные сети, пространственно-частотная фильтрация, согласованная фильтрация, фМРТ исследования, принятие решений

Abstract

The man's face was always the subject of intense interest to psychologists, physiologists, physicians, artists, lawyers and engineers. Face perception allows us to study mechanisms of unconscious and conscious perception. The important area of research is the study of the perception of facial deformations as a means of non-verbal communication. The paper deals with the psychological problems of the study of mechanisms of perception of facial expressions and the study of neural networks that provide this perception. Methods of neuroiconics – the science of image perception and recognition allowed to carry out digital synthesis and digital processing of test pictures of the faces with a different expression of emotions and the position of the head. The responses of neural networks of the retina and up to the frontal brain we investigate using methods of functional magnetic resonance imaging. Responses of neural networks also have been studied by digital imaging of brain structures responses. The authors demonstrate the neural mechanisms of discrimination the friend from foe.

Keywords: face, facial expression, face recognition, receptive fields, neural networks, spatial-frequency filtering, matched filtering, fMRI studies, decision-making

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-15-00918).

В когнитивных исследованиях ключевыми являются два направления – нейролингвистика и нейроиконика. «Слуховой Мозг» человека состоит из приемника звука – слухового анализатора и системы воспроизведения биологически значимых звуков – средств вербальной коммуникации. «Зрительный Мозг» человека также состоит из системы восприятия изображений и выделения в них биологически значимой информации и системы «синтеза изображений» – средств невербальной коммуникации, к которым относятся мимика, жесты, телодвижения и т.д. Под «синтезом изображений» понимается напряжение определенных мышц и объединение данных напряжений в целостное изображение выражения лица, несущего биологически значимый сигнал собеседникам, и воспринимаемого оптической системой наблюдателей. Одним из направлений исследования «Зрительного мозга» является нейроиконика – наука о восприятии изображений, синтезе, обработке и описании тестовых изображений, в том числе, изображений лица и цифровом анализе изображений карт активности нейронных сетей, обеспечивающих распознавание изображений лица человека и мимики.

Взаимосвязь между напряжением мышц лица – «деформациями» и его выражением – «мимикой» интересовала исследователей, как минимум, со времен Гиппократа. Физиогномика, изначально направленная на возможность оценить проявление черт врожденного характера человека по конструкции и выражению лица, хотя и добилась более чем за две тысячи лет важных, но все же незначительных успехов, однако до сих пор остается больше искусством, чем наукой. Развитие физиологических технологий в описании влияния сиюминутных эмоций на мимику и жесты получило значительно более интенсивное развитие и даже получило собственное название – «фациопсихология» (Барабанщиков, 2012, 2014).

Психофизиологические исследования показали, что, по оценке мимолетных реакций исследуемого, повторенных многократно в разных

условиях стимуляции, возможно оценивать даже характер человека и тип высшей нервной деятельности по терминологии И.П. Павлова.

Во время общения с собеседником, во время восприятия изображений, в процессе деятельности и размышлениях, происходят различные деформации лица, как результат постоянных, как выраженных, так и незаметных мышечных сокращений. Незаметные для наблюдателя микроскопические сокращения обычно запускаются подсознательно, но их можно зарегистрировать (Tamietto, de Gelder, 2010). Выраженные деформации лица – мимика – так же имеют произвольный и непроизвольный компонент. Часто повторяемый тип деформаций с возрастом приводит к изменению рельефа поверхности кожи – к морщинам, своеобразной карте проходящей жизни. Лев Николаевич Толстой в повести «Детство» (Толстой, 1852), первой части его знаменитой автобиографической трилогии, пишет о том, что для распознавания сиюминутного эмоционального состояния человека достаточно оценить мельчайшие изменения уголков его глаз и губ. Если слово «мельчайшие» или «минимальные» изменения трактовать как изменения элементов мимики, видимые на пределе разрешения (на пределе остроты зрения), то можно решить целый ряд важнейших задач для понимания значения выражения лица как средства невербальной коммуникации в жизни человека.

Если проводить измерения изменений мимики на пределе остроты зрения, легко установить максимальную дистанцию, при которой происходит узнавание выражения лица. Этот подход позволяет определить размер «функционального пикселя» зрительной системы – рецептивного поля, обеспечивающего распознавание лица на пределе разрешения, необходимую плотность расположения этих пикселей и необходимое для распознавания лица их число. Применение физиологического термина в упомянутом тексте Льва Николаевича позволяет применить фразу великого писателя как формулировку физиологической проблемы, которая оказывается вполне

решаемой и даже имеющей значение для развития информационных технологий. Иными словами, исследования предельных возможностей сводится к определению характеристик воспринимаемой матрицы рецептивных полей на пределе разрешения. Такая формулировка сразу дает возможность поставить следующую задачу – определить работу перестраивающихся нейронных сетей, каналов, которые участвуют в процессе распознавания лиц. Эти каналы (нейронные) сети начинаются в сетчатке. Поэтому основные принципы обработки информации заложены именно в конструкции сетчатки глаза человека.

Чтобы расшифровать психофизиологическое значение фразы Л.Н. Толстого мы должны знать, какова должна быть минимальная матрица рецептивных полей, обеспечивающая распознавание лиц. Согласно критерию Джонсона, предложенного им еще в 50-е годы 20 века, для грубого различения самолетов на «свой – чужой» достаточна матрица в 8x8 элементов. При такой матрице детали лица не увидеть, а виден «смайлик» – гротеск улыбки и грусти, но не видны минимальные изменения уголков глаз и рта, о которых писал Л.Н. Толстой, и не ответить на вопрос – кто перед тобой друг или враг.

Известно, что если расстояние между двумя точками меньше 1 угл. минуты, они воспринимаются человеком с нормальной остротой зрения как одна точка, при расстоянии, немного превышающем 1 угл. минуту – как короткий штрих, а при расстоянии 1,5-2,0 угл. мин возможно уверенное различение точек как отдельных. Эти величины известны с античных времен, с 19 века понятно, что лимитирует разрешение дифракция. Согласование этих характеристик со свойствами рецептивных полей нами проведено подробно (Кемпбелл, Шелепин, 1990; Шелепин, Бондарко, 2002).

«Бесконечно» малая светящаяся точка – звезда, на сетчатке, даже при идеальной оптике, при эметропии, образует размытое пятно, описываемое

функцией рассеяния. Основание функции рассеяния на высоте 20% захватывает область до 7 рецепторов. В силу гексагональной упаковки колбочек в фовеа, один из рецепторов расположен в центре, а шесть – в вершинах «правильного» шестиугольника, образованных мозаикой колбочек. Это означает, что на уровне рецепторов именно оптика глаза формирует начальную нейронную сеть – рецептивное поле, «функциональный» элемент дискретизации – пиксель зрительной системы. Свет формирует пиксель зрительной системы – начальный элемент нейронной сети. Входное изображение попиксельно вводится в мозг. Так как установлены размеры пикселя зрительной системы на пределе разрешения, то мы можем определить размеры в пикселях любого изображения, которое мозг воспринимает как целостный объект.

Поэтому для понимания восприятия лица мы должны учитывать размеры рецепторных полей, из пикселей которых построена минимальная матрица для распознавания лица. Для изображений многих объектов определен тот минимальный размер, при котором они оказались четко видимыми. 3-5 угл. мин – буквы, около 8 угл. мин – изображения большинства окружающих объектов, транспортных средств, около 13 угл. мин – фигура человека, поза, осанка, а 21 угл. мин – лицо человека с важнейшими для понимания штрихами мимики как средствами невербальной коммуникации (Кемпбелл, Шелепин, 1990; Шелепин, Бондарко, 2002). Для матрицы с диаметром 21 угл. мин радиус гексагональной матрицы составит 9 элементов разбиения (рецептивных полей). Зная, что среднее межзрачковое расстояние реального лица равно 65 мм, можно предсказать что лицо человека можно узнать на расстоянии 35 м. Подобная удаленность является чрезвычайно важной для распознавания мимики. Если бы матрица, рецептивных полей была вдвое больше, то максимальное расстояние, с которого лицо было бы узнано, сократилось вдвое и составило 17 м. Это привело бы к различным неприятным последствиям для человека на

различных этапах эволюционного и исторического развития. Оптимальное согласование размеров матрицы гексагональных элементов дискретизации, самих элементов с оптическими свойствами света позволяет человеку на максимальном, физически возможном расстоянии отличить врага от друга (friend from foe).

Матрица с радиусом около 9-11 гексагональных элементов дискретизации соответствует размерам центральной части фовеа – фовеолите с диаметром равным 20-30 угл. мин. В ее пределах острота зрения не меняется. Интересно, то при фиксации взора на точке глаз, мы не можем жестко фиксировать взор. При хорошей фиксации наблюдаются два типа колебаний глаза: ± 12 угл. мин – это минимальный радиус фовеолиты, $\pm 2,5$ угл. мин – это максимальный радиус рецептивного поля фовеа (Гасовский, Никольская, 1941). Эти микродвижения, микросаккады сохраняются не только при длительной фиксации, но и фиксации после переводе взора на цель (Priviteraа С.М. et all, 2014). Это означает, что при переводе взора по сцене и наведении его на лицо или глаза человека появятся два типа неосознаваемых микродвижений глаз наблюдателя, обеспечивающих сканирование в пределах фовеолиты. При наведении взора на лицо, при угловых размерах лица в 20-30 угл. мин «тепловая» карта приближается к слегка деформированному кругу и определяется случайным, вероятно, нормальным распределением микросаккад. Совсем другая картина распределения макросаккад. Если мы рассматриваем лицо фронтально при больших угловых размерах лица, то мы можем видеть Т-образные «тепловые» карты, обусловленные статистическим распределением саккад по маршруту глаза-рот (Барабанщиков, 2012). Известные карты Альфреда Лукьяновича Ярбуса демонстрируют распределения движений глаз при рассматривании лица вблизи. Это в основном осознанные, целенаправленные и распределенные по всему лицу макросаккады и области «фиксации» взора с преимущественной локализацией в областях интереса: глаза, нос, рот, уши,

волосы. Напоминаем, что во время «фиксации» взора возникают неосознаваемые микросаккады.

Многослойные (пирамидальные) модели зрительной системы с разным разрешением получили широкое распространение, существуют их различные вариации. Изучать один слой пирамиды возможно только при изучении фовеолы, слое пирамиды с максимальным разрешением. Для многослойных систем распознавания важно то, что каждый слой имеет разное разрешение. Каждый слой модели имеет все меньшее разрешение, так как размер функционального пикселя в каждом слое возрастает. Отношение размера между соседними слоями вероятно близко к золотому сечению (Shelepin et al, 1989). Число пикселей в каждом слое одно и то же. Это ключ к пониманию того, что изучая фовеолу, мы изучаем свойства каждого из слоев в рамках пирамидальной модели зрительной системы, обеспечивающих инвариантность восприятия к размеру.

Размер матрицы центральной части фовеа, собранный, допустим, из неперекрывающихся гексагональных рецептивных полей, приблизительно равен 169. Если каждый из элементов матриц может принимать два значения, т.е. срабатывать на темноту и светлоту, это составит 2^{169} комбинаций. Это число поистине «астрономическое». В то же время человек оперирует почти каждым гексагональным элементом в матрице из 169 рецептивных полей. Матрица с таким числом рецептивных полей позволяет представить в мозгу человека даже особенности мимики воспринимаемого лица, например, улыбку, отражающей эмоциональное выражение лица. В рассматриваемой матрице для изменения описания улыбки достаточно перестановки одного-двух элементов дискретизации. Для этого достаточно сравнить изображения Марлин Монро и Кейт, представленных на рисунке 1.



Рисунок 1 – Изображения Марлин Монро и Кейт. Если их смотреть на пределе разрешения, то отличие бинарных портретов всего в несколько функциональных пикселей делают их лица различимыми (Campbell, Shelepin, 1989, 1992; Кемпбелл, Шелепин 1990)

Необходимо подчеркнуть, что разрешающая способность в центре и на периферии сетчатки разная. Новые измерения позволяют утверждать, что диаметр фоторецепторов в центральной части фовеа, фовеоле и в фовеолите составляет в среднем $0,4 \pm 0,2$ угл. мин, т.е. у отдельных людей диаметр колбочки в фовеоле может составлять всего $0,2$ угл. мин. Фовеолита – область максимально высокой остроты зрения, с удалением от нее острота зрения падает. Колбочки в фовеоле плотно упакованы. С удалением от фовеолы размеры рецепторов растут, и увеличивается пространство между ними, заполненное палочками, разрешающая способность падает. Это смещение обусловлено тем, что в центре поля зрения представлены преимущественно мелкие рецептивные поля, а на периферии все более крупные. Они увеличиваются пропорционально удаленности от центра. Мелкие рецептивные поля передают высокие пространственные частоты, а крупные – низкие. Демонстрация передачи информации в головной мозг рецептивными полями ганглиозных клеток разных участков сетчатки (в зависимости от эксцентриситета) представлена на рисунке 2.



А

Б

Рисунок 2 – Слева – исходное изображение лица. Справа – моделирование методами цифровой обработки изображений описания лица, которое передается от сетчатки в мозг при условии фиксации взора на правом зрачке объекта наблюдения.

Результат учитывает снижение передачи высоких пространственных частот с эксцентриситетом по сравнению с исходным изображением.

На рисунке 2Б представлен результат имитации (путем цифровой обработки изображения) описания лица, которое передается от сетчатки в мозг, при условии фиксации взора на правом глазе портрета. При свободном просмотре всей поверхности портрета видно, что изображение размыто с удалением от правого зрачка. Существует правило, согласно которому правая или левая сторона портрета дается относительно лица, изображенного на портрете, но не относительно наблюдателя (Барабанщиков, 2014). Если фиксировать взор на зрачке правого глаза портрета, то размытие, наблюдатель ощущать не будет, а если будет, то незначительно. Наблюдатели не видят размытости изображений на периферии, так как на периферии поля зрения нет элементов, выделяющих высокие пространственные частоты, а заметить размытие изображения можно только при наличии сравнения отклика в высокочастотном и низкочастотном канале. Это связано с тем, что при удалении от центра сетчатки от фовеолиты, мы имеем все увеличивающиеся по размерам рецептивные поля

«функциональные пиксели» зрительной системы. В соответствии с пирамидальной моделью зрительной системы только в фовеолите в центре фовеолы матрица самых мелких гексагональных пикселей, но именно здесь есть еще и более крупные пиксели, перекрывающие фовеолу и фовеа. На периферии чем дальше от центра, тем меньше мелких рецептивных полей и все больше все более крупных. Наша невозможность оценить искажения на периферии, вызванные отсутствием на периферии поля зрения мелких рецептивных полей, дает инструмент к созданию пространственных метамеров, по аналогии с хроматическими метамерами. Примеры таких пространственных метамеров уже вошли в руководства для студентов (Шелепин, 2007).

Еще легче создавать пространственные метамеры с помощью пространственно-частотной фильтрации. На этом построены и многие системы сжатия изображений (JPEG). Зрительная система чувствительна к определенной полосе подаваемых на ее вход пространственных частот изображения. Кемпбелл и Робсон еще в 1964 году предположили, что в зрительной системе есть набор каналов, настроенных на разные пространственные частоты, по аналогии с тем, как в слуховой системе есть каналы, настроенные на разные звуковые частоты (Campbell, Robson, 1968; Филд, 1999)

Работы Кемпбелла и его учеников дали возможность использовать пространственно-частотный анализ изображений для описания работы зрительного анализатора. Пространственно-частотный анализ изображений – это мощный инструмент изучения работы «зрительного» мозга. Практическое применение его сводится к измерению контрастной чувствительности человека к синусоидальным решеткам или решеткам Габора различной пространственной частоты и к построению частотно-контрастных характеристик зрительной системы человека, которые отражают видимый человеком в пороговых условиях наблюдения пространственно-

частотный диапазон. Любое изображение, в том числе и изображение лица, может быть описано пространственно-частотным спектром. Сопоставление частотно-контрастных характеристик зрения и пространственно-частотного спектра наблюдаемых изображений позволяет предсказать видимость объектов.

Общий вид частотно-контрастной характеристики, несмотря на множество различий в способах измерения, довольно характерен. Контрастная чувствительность минимальна (равна нулю) при нулевой пространственной частоте и равна нулю при верхней граничной частоте, расчетной 60 цикл/угл. град. В действительности, обычно, наблюдатель перестает видеть тестовую решетку около 30 цикл/угл. град. Максимальная чувствительность зрительной системы человека находится в области средних пространственных частот от 1 до 7 цикл/угл. град. Максимум изменяется в зависимости от средней яркости стимула и адаптации глаза. Предельный видимый диапазон пространственных частот захватывает область от почти нулевой пространственной частоты до самой высокой расчетной пространственной частоты в 60 цикл/угл. град. Эта особенность оптики глаза приводит к тому, что не все детали объекта могут быть отражены в его изображении на сетчатке. Самую высокую частоту, которую еще видит человек, называют верхней граничной частотой. Обратная ей величина, т.е. минимально различимый период решетки, соответствует величине остроты зрения. Она зависит от таких структурных особенностей оптики глаза, как фокусное расстояние и диаметр зрачка. На спектральном языке оптика глаза представляет собой фильтр низких частот. В реальной зрительной системе эметропического глаза без искажений передаются частоты значительно меньше 60 цикл/угл. град, всего лишь до 30 цикл/угл. град. Соответственно период этих решеток составляет 1 и 2 угл. мин. Данное ограничение при малом зрачке обусловлено дифракцией. Таким образом, мы вышли опять на базисную величину в 1 угл. мин, применяя пространственно-частотный

подход, лимитируемую дифракцией. Аберрации в норме чрезвычайно критичны при большом зрачке, патологические формы аномалий рефракции мы не рассматриваем.

Функциональные элементы обработки изображений (пиксели) – рецептивные поля ганглиозных клеток сетчатки обычно почти круглые и их весовая функция представляет собой разницу двух гауссиан. Так как они разных размеров, с разными весовыми функциями, они являются фильтрами разных пространственных частот (Глезер и др. 1975; Цуккерман, 1979; Цуккерман, Шостацкий, 1978; Филд, 1999). На рисунке 3 представлены результаты моделирования работы рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки.

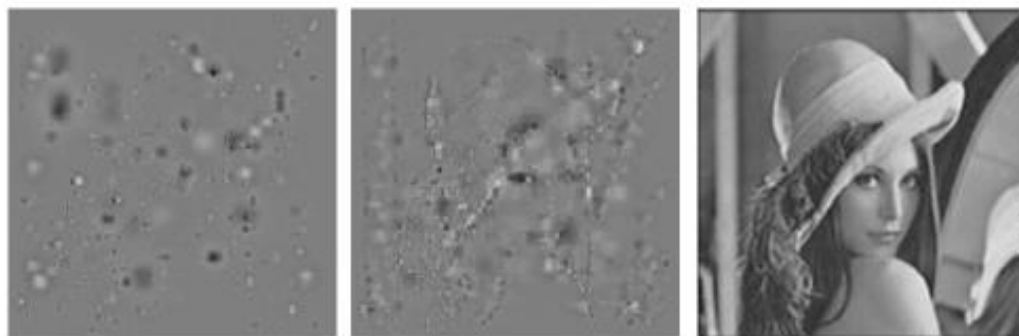


Рисунок 3 – Имитация круглых рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки, представленных DOG-функциями (разностью двух гауссиан). Левый кадр около 5%, правый почти все, а средний кадр содержит не более 15% от общего числа рецептивных полей, промоделированных DOG функциями.

Из рисунка 3 видно, что уже около 20% от всех рецептивных полей дают возможность распознать изображение. При 20% происходит распознавание лица, а при 80% невозможно отличить изображение от оригинала. Пороговое значение в 20% своего рода иллюстрация известного принципа Парето, частного случая принципа наименьшего действия основного физического принципа. При 70-80% рецептивных полей человек почти не может отличить изображение от 100% – это демонстрация возможности создания эффективных пространственных метамеров.

Сигнал из сетчатки об изображении лица через подкорковые ядра передается в зрительную кору в область ВА 17 по Бродману. Рецептивные поля нейронов зрительной коры вытянуты и напоминают элементы Габора. На следующем рисунке 4 представлена имитация работы вытянутых рецептивных полей нейронов первичной зрительной коры.

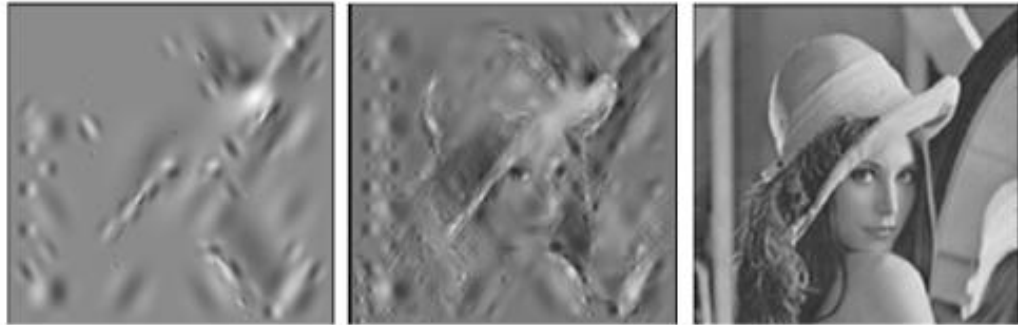


Рисунок 4 – Имитация работы рецептивных полей нейронов первичной зрительной коры. Средний кадр содержит не более 15% от общего числа рецептивных полей, промоделированных как элементов Габора.

Вытянутые рецептивные поля зрительной коры не только вырезают определенную полосу пространственных частот из спектра изображения с шириной приблизительно в 1,5 октавы, но и определенный участок ориентационной составляющей двумерного пространственно-частотного спектра. На трех кадрах рисунка 4 показана разная плотность перекрытия изображения рецептивными полями. Слева – малая плотность, справа – максимальная. Это аналог Голин-теста или Муни-теста, но созданный для полутоновых картинок. На этих рисунках рецептивные поля всех размеров, и выделяют они разные контрасты.

Если представить все элементы, имитирующие рецептивные поля, либо как низкочастотные, либо как высокочастотные, то получаются два разных типа изображений. Результат такой обработки представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Изображение лица, передаваемое в разных каналах:
слева – в низкочастотном и справа – в высокочастотном.

Вблизи низкочастотное изображение размером 65х65 мм кажется сильно искаженным, и лицо практически неузнаваемо. Справа высокочастотное лицо того же размера в мм узнаваемо, но комфортному восприятию мешает ореол, побочный результат фильтрации. Если отойти на достаточное расстояние от книги, то оба лица воспринимаются комфортно и хорошо узнаются. Эти два типа фильтрации можно сопоставить с разными техниками в живописи. Низкочастотная фильтрация дает изображения, которые напоминают размытые картины, присущие технике импрессионизма, а высокочастотная напоминает графику (Шелепин и др., 1985). При высокочастотной фильтрации при всех расстояниях мы можем осознанно оценить эмоциональное состояние человека по деталям лица. Зато низкочастотное описание дает более выраженное эмоциональное воздействие на наблюдателя и, зачастую, это воздействие неосознанное. Это неосознанное воздействие особо выражено при очень больших угловых размерах изображения лица, активирующих самые низкочастотные каналы. Выражено оно и на периферии поля зрения, когда нам «кажется», что промелькнуло лицо (иногда даже угадываем «врага или друга» краем глаза). Низкочастотное изображение движущегося лица более заметно по сравнению со статичным изображением.

Важно напомнить, что двумерный спектр изображений несет информацию как об амплитудных и фазовых значениях пространственно-частотных составляющих, так и об ориентационных. В первичной зрительной коре (ВА 17) имеются системы нейронов, выделяющих преимущественно средне- и высокочастотную полосу пространственных частот видимого спектра и, главное, их ориентационную составляющую. Рецептивные поля осуществляют локальную фильтрацию. При решении задачи «узнавания» лица на простом фоне зрительная система использует горизонтальные составляющие пространственно-частотного спектра изображения, которые в воспринимаемом образе формируют брови, глаза и губы. Эти визуальные ключи могут быть упрощены до чередующихся темных и светлых полосок различной ширины, получивших название «штрих-код лица» (Мурыгин, 2003; Dakin, Watt, 2009, Логунова и др., 2014). При этом, несмотря на различные манипуляции со стимулами (изменение размера, освещения, ракурса), «штрих-код» остается неизменным для конкретного лица и позволяет узнать воспринимаемый образ.

Варианты цифровой фильтрации с использованием элемента Габора в двух ориентациях – вертикальной и горизонтальной – позволяют установить, что горизонтальные составляющие хорошо выделяют не только лицо, но и объекты других семантических категорий, находящихся на заднем плане. Однако во многих случаях горизонтальных составляющих оказывается недостаточно. Оптимальной для выделения фигуры человека оказывается вертикальная фильтрация: она наиболее эффективно определяет размер и положение вертикального объекта, что является первоочередной задачей обнаружения человека в восприятии сложных сцен. Именно вертикальные составляющие определяют очертания всей фигуры человека.

Обнаружение и категоризация движущегося на сложном фоне объекта являются одной из непростых задач. На периферии поля зрения движение объекта обнаруживается еще до отчетливого восприятия его формы и

категоризации. После этого, за счет поворота глаз, объект попадает в фовеальную часть сетчатки, где и происходит детальный анализ его свойств. При анализе сцен, где основной задачей является выделение фигуры человека, зрительная система в первую очередь выстраивает шаблон для движущегося объекта преимущественно за счет вертикальных составляющих, что и позволяет при восприятии соотнести наблюдаемый объект с определенной семантической категорией.

Конструкция «зрительного мозга», используя вертикальные составляющие, строит шаблон, который позволяет соотнести движущийся объект с категорией «человек», после чего с помощью горизонтальных составляющих строится «штрих-код лица», с помощью которого и происходит идентификация лица. Когда объектом анализа в зрительной системе наблюдателя является лицо человека, для выявления паттернов невербальной коммуникации, проявляющихся в минимальных изменениях мимики, уже недостаточно информации, содержащейся в горизонтальных и вертикальных пространственно-частотных составляющих изображений. Мы предположили, что она содержится в диагональных составляющих (Логунова и др., 2014).

За счет диагональной пространственно-частотной фильтрации эмоционально значимых мелких морщин в уголках рта и глаз, существенно изменяется, вплоть до гротеска, восприятие лиц, запечатленных на отфильтрованных изображениях. Это мы делаем аппаратно-программным способом. В мозгу наблюдателя подготовка изображения для выделения незначительной, практически скрытой информации происходит неосознанно в рецептивных полях затылочной коры в результате «аналогичных» процессов, напоминающих локальную пространственно-частотную фильтрацию с использованием вейвлетов, подобных элементам Габора. Эту фильтрацию можно рассматривать как особую маску, «грим», подчеркивающий мимические особенности при восприятии лиц, которые

являются опорными сигналами для механизмов зачастую неосознанного принятия решения на более высоких уровнях зрительной системы (рисунок 6). Роль диагональных составляющих также можно продемонстрировать, если обратиться к исходной фотографии в знаменитой демонстрации «Иллюзии Маргарет Тэтчер» Питера Томсона (Thompson, 1980).



Рисунок 6 – Портрет бывшего премьер министра Маргарет Тэтчер слева, а справа – этот же портрет после диагональной вейвлетной фильтрации в черно-белом исполнении.

Однако Питер Томсон при создании знаменитой «Иллюзии века» исходно не учитывал роль фильтрации в создании гротеска. Иллюзия, предложенная Томсоном, состоит в том, что даже если значительно исказить лицо человека и предъявлять его вверх подбородком, то наблюдатель не может его отличить от изображения исходного и так же перевернутого. Этот эффект перекликается с наблюдениями фотографов 19 века, которые заметили, что проходящие клиенты не могли распознать свой собственный изготовленный портрет лежащий подбородком вверх.

Если изображения не являются полными, то даже невозможно распознать в перевернутом изображении лицо (рисунок 7). Эффект отсутствия узнавания при развороте «вверх подбородком» использован и при

распознавания неполных изображений из набора Муни-тест (Rodriguez et al., 1999). Авторы этой работы допустили неточность, так как они разворачивали исходный первый кадр слева на рисунке 7 из набора Муни-тест на 180 угл. град. Тем самым доминирующая черная часть этого кадра оказывалась справа, а для регистрации вызванных потенциалов сильная неоднородность яркости по кадру вносит непоправимые искажения. На рисунке 7 кадр, представленный в центре, демонстрирует разворот лица первого кадра, сделанный правильно вокруг горизонтальной оси, поэтому глобальная структура теста осталась неизменной – черная поверхность справа. Лицо вверх подбородком оказалось совершенно неузнаваемым, как и при повороте на 180 угл. град.



Рисунок 7 – Муни-тест перекрытых фигур, неполных и разорванных фигур (Mooney С.М., 1954).

Впервые Муни предложил свой тест в диссертации «SOME NEW CLOSURE TESTS» by Craig M. Mooney submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research of McGill University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Arts, in April, 1951.

Муни-тест в последние годы получил широкое распространение в психологической и клинической практике. Особенный интерес представляет

версия с дополнительной фрагментацией и всевозможными преобразованиями неполного Муни-теста, напоминающего Голлин-тест (Foreman, 1991; Rodriguez et al., 1999; Verhallen et al., 2014).

Если изображения Маргарет Тэтчер в исходной публикации Питера Томсона были в нормальной ориентации (подбородком вниз), то наблюдатель легко различал исходное и искаженное изображения. При этом наблюдатель узнавал, чей это портрет, несмотря на значительные искажения. Питер Томсон вырезал из лица два прямоугольника один содержащий оба глаза, а второй содержащий губы развернул их на 180 угл. град и прикрепил их в том же месте. Интересно, что наблюдатели не просто узнавали, но и понимали, что это гротеск. Следует заметить, что многократные попытки продемонстрировать выраженный гротеск как составную часть иллюзии, предложенной Томсоном на самых различных лицах, не всегда получался эффективным. Это означает, что должны быть определенные черты лица, которые и дают сильную эмоциональную окраску изображения. Когда мы отфильтровали исходный неискаженный портрет Маргарет Тэтчер с помощью диагональной фильтрации, мы получили выраженный гротеск практически идентичный эффекту, который получил Томсон с разворотом положения губ.

Диагональная вейвлетная фильтрация не объясняет то, что поворот на 180 угл. град стирает индивидуальные и, главное, эмоциональные черты, но объясняет эффект гротеска для некоторого типа лиц в иллюзии, открытой Питером Томсоном из Йорка. Проведенные нами исследования по инвариантности восприятия фрагментированных изображений к масштабу и повороту говорят о том, что имеет место практически полная инвариантность при изменении масштаба изображений в диапазоне от 0,5 угл. град до более чем 50 угл. град, то есть на два порядка. Инвариантность же к повороту составляет около ± 30 угл. град (Чихман и др., 2009).

Рассмотрим основные каскады обработки информации, которые обеспечивают восприятие и узнавание лица. Руководящая модель, которая принята нами для понимания основных процессов, происходящих в мозгу при приеме и распознавании внешних сигналов изображений – это модель согласованной фильтрации, предложенная и успешно развитая у нас Н.Н. Красильниковым, а в США – Таннером и Светсом еще в 50 годы 20 века (Красильников и др., 1999; Филд, 1999; Жеребко, Луцив, 1999).

В соответствии с моделью, сначала происходит первичная фильтрация в многочисленных параллельных фильтрах, затем идет согласованная фильтрация и, наконец, на высоких уровнях зрительной системы происходит принятие решения. В процессе принятия решения возможны ошибки, но они, как правило, имеют экологически обусловленный смысл. Приведем пример подобной ошибки (рисунок 8).

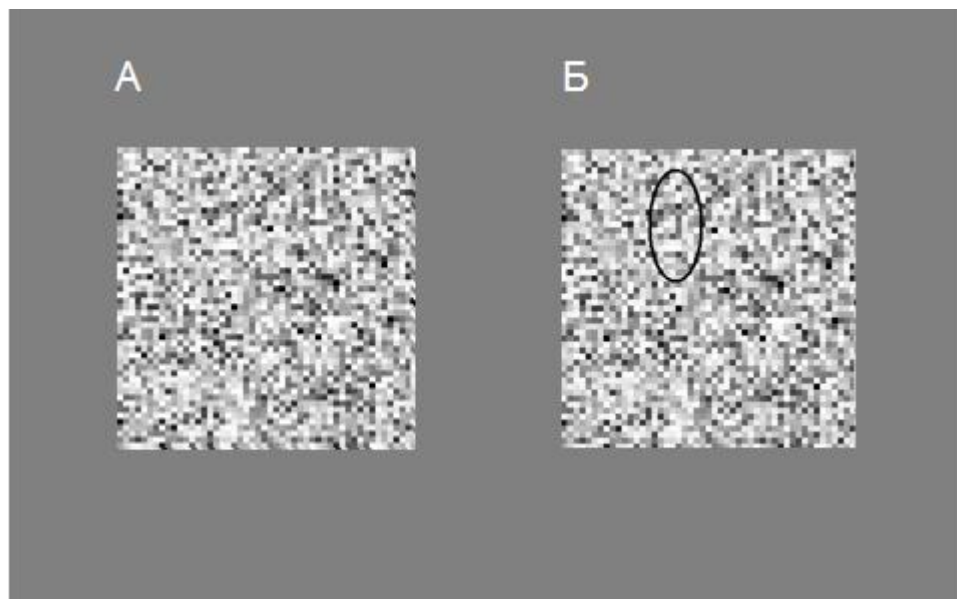


Рисунок 8 – Изображения двух кадров, заполненных одной и той же реализацией белого шума. Изображения лиц в обоих кадрах отсутствуют. Получив инструкцию определить, есть ли в кадре 8А изображение лица, большинство испытуемых с затруднением, но находят это изображение в том или ином участке кадра. Изображение 8Б – на ту же реализацию «белого» шума нанесен овал, имитирующий овал лица. Это своеобразная подсказка, прайминг. Положение овала на кадре выбрано случайно. Однако все испытуемые говорят утвердительно, что видят лицо именно в том месте, где расположен овал.

В данном случае к полосовой пространственно-частотной фильтрации подключается фильтрация согласованная. Согласованный фильтр лица – «штрих-код лица», вероятно, задан частично генетически, так как новорожденные смотрят преимущественно на изображения схематического лица, а не на изображение, составленное из хаотически разбросанных элементов формы этого же лица. В процессе жизни множество лиц запоминается, т.к. согласованные фильтры обучаемы. Операцию сравнения наблюдаемого и хранящегося в памяти лица выполняют обширные нейронные структуры. Выделяется инвариантное лицо, лицо вообще и лицо конкретного человека в определенные периоды его жизни. Лучше запоминаются фотографии лица, так как мимика в них фиксирована.

Наличие согласованного фильтра, выделяющего лицо, позволяет нам в хаотических случайных структурах в белом шуме видеть лицо. Механизм избирательного внимания направляет взор на «подсказанное» место кадра. При просмотре кадра 8Б возникает, как и при просмотре предыдущего кадра 8А, ошибка восприятия, но испытуемый увереннее делает ошибку в наличии и в локализации лица, которого там нет, лицо кажется расположенным именно там, благодаря праймингу. Заметим, что прайминг имеет как свойства демаскировки («торчащие за кустами уши волка»), так и маскировки (ложный прайминг). Ложный прайминг резко усложняет ситуацию. В обычных условиях наблюдения без ложного прайминга «ошибка» восприятия лица в неопределенных, даже в близких к белому шуму структурах, не содержащих изображения лица, имеет важное экологическое значение, так как при плохой видимости в ситуациях, когда возможна встреча с врагом, «ложная тревога» намного предпочтительнее, чем позднее распознавание реальной опасности.

Понимание механизмов работы конечного звена обработки информации, блока принятия решения, его структура и локализация, представляет значительный интерес. В наших предыдущих работах было

показано, что во фронтальной коре существуют множественные области, участвующие в принятии решений о различных свойствах формы наблюдаемого объекта (Шелепин и др., 2009). Ранее нами в качестве стимулов были использованы матрицы, состоящие из решеток Габора различной ориентации. Задача испытуемого заключалась в определении доминирующей ориентации. Было отмечено, что принятие решения происходит путем перераспределения активности в оппонентных структурах фронтальной коре головного мозга. Перераспределение активности взаимосвязанных структур головного мозга происходит и при решении задач распознавания мимики. Обнаруженное перераспределение активности предполагает, что формирование определенной мозаики активности нейронной сети, обеспечивающей распознавание выражения лица или его поворота и последующее принятие решения, обеспечивается как самим входным сигналом, так и задачей, стоящей перед испытуемым, с учетом внутреннего состояния наблюдателя. Напомним, что даже первичная элементарная нейронная сеть – рецептивное поле – формируется свойствами света и оптики глаза. Изменение пространственно-временной активности «высших» отделов мозга происходит в зависимости от множества различных факторов: смены контекста, изменения экспериментальной ситуации, например, инструкции и т.д. В наших предыдущих исследованиях мы использовали стимулы (решетки Габора), не являющиеся эмоционально значимыми для наблюдателей. Интерес же представляет изучение локализации и специфики функционирования механизма принятия решения в задачах распознавания лица человека как биологически значимого стимула в условиях смены инструкции. Мы предположили, что при одном и том же наборе стимулов, но в условиях разных инструкций, будут выявлены отличающиеся карты активации нейронной сети, обеспечивающей распознавания лиц, которые предполагают включение разных каналов обработки информации.

В качестве стимулов были использованы оптоклоны виртуальных людей. Выбор данного класса изображений был обусловлен возможностью контролировать различные экспериментальные условия, например, степень выраженности эмоциональных состояний и угла поворота оптоклонов. На рисунке 9 приведены варианты предъявляемых стимулов на примере одного оптоклона. Всего было синтезировано 36 разных лиц. Стимулы предъявлялись на фоне аддитивного шума.



Рисунок 9 – Примеры синтезированного изображения лица виртуального человека с разными поворотами и разными выражениями эмоций в фазе 1

В фазе 1 многократно предъявлялись изображения 36 виртуальных лиц, но изображения этих лиц давались в разных поворотах, при разных выражениях эмоций. В фазе 2 предъявлялись нейтральные лица, ориентированные прямо. Наблюдатели в фазе 1 получали одни и те же две инструкции: определять поворот лица (влево-вправо) или оценивать эмоцию (радость-грусть). Важно подчеркнуть, что набор стимулов был одинаковым как в задаче определения эмоции, так и в задаче определения поворота лиц. В фазе 2 требовалось поочередно нажимать на правую и левую клавиши мыши на каждое предъявление стимула.

Было произведено вычитание распределения активности по всем вокселям из фазы 1 распределения активности в фазе 2. На рисунке 10 приведены результирующие карты активации после вычитания, полученные в условиях определения эмоции и определения поворота лиц оптоклонов

влево или вправо. Видно, что уровень активации в задаче определения эмоции лица несколько повышен по сравнению с определением поворота.

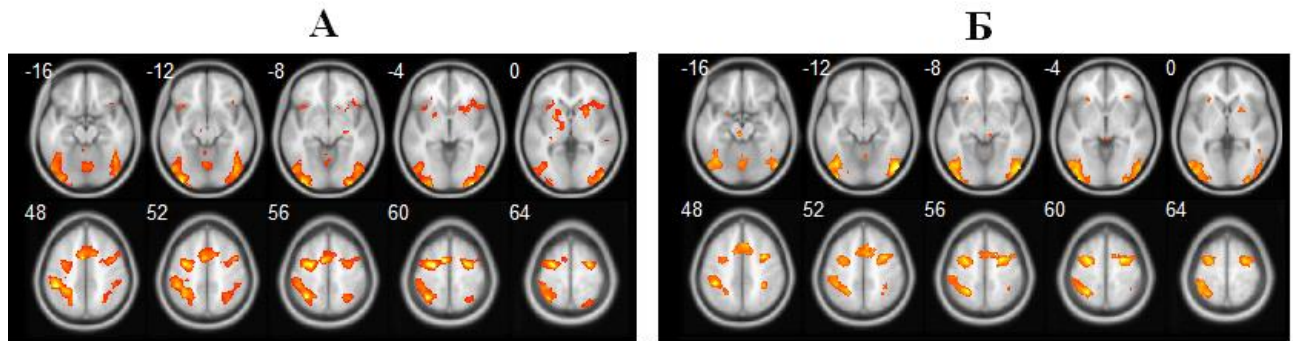


Рисунок 10 – Результирующий уровень активации при вычитании активности из фазы 1 активности в фазе 2. Усредненный уровень активации для группы из 24 человек (FDR-corrected, $p=0,05$) в задачах на определение эмоции (А) и поворота (Б) в фазе 1

В результате вычитания активности из фазы 1 распределения активности в фазе 2 для обеих задач (определение эмоции, определение поворота), согласно полученным данным, наблюдается специфический паттерн системы распознавания лиц: видна активность «классической» зоны – фузиформной извилины нижневисочной коры, важнейшей для распознавания лица, и «дополнительных зрительных» зон теменной и фронтальной коры головного мозга (рисунок 10). Фузиформная кора обеспечивает запоминание лиц и их частей, как вообще большая часть нижневисочной коры хранит в памяти и осуществляет выбор из памяти значимых для человека объектов. Теменная кора обеспечивает внимание и пространственный выбор. Большое число активированных вокселей наблюдается в области премоторной коры (далее ВА 6). Нейронные конструкции этой зоны вовлечены в переход от принятия решений к организации и планированию действий. Вентральные части ВА 6 функционально связаны с предметным вниманием, а дорсальные – с пространственным вниманием (Schubotz et al., 2001). В задачах распознавания лиц, как мы видим, эта область принимает активное участие.

Ранее особый интерес эта область представляла как зона когнитивного анализа, грамматики и связи символического значения объектов, расположенных в пространстве (Черниговская 2008, 2010; Takashi Hanakawa, 2002).

Полученные нами данные демонстрируют обширную активацию в теменных отделах головного мозга, особенно в нижней и верхней частях теменной доли. Построены функциональные карты теменной коры, показано что теменная кора играет ключевую роль в пространственном внимании, описании пространства, пространственных отношениях, отношениях между индивидуумами, индивидуумом и добычей (Nyvarinen, Shelepin, 1979). Активация данного паттерна в наших условиях, скорее всего, определена спецификой постановки экспериментальных задач – оценки поворота носа (направо-налево) и уголков губ (вверх-вниз). Наблюдается невысокий уровень активации в островковой доле конечного мозга (инсуле) и путамене. Необходимо отметить, что роль инсулы в эмоциональном восприятии, особенно при работе со стимулами, вызывающими негативные эмоциональные реакции, подтверждена в многочисленных исследованиях (Senju et al., 2009; Conty et al., 2007). По данным субъективных отчетов испытуемых оптоклоны воспринимались без удовольствия. Принято считать, что к основным функциям путамена относятся: обучение с подкреплением, подготовка и управление двигательной активностью, участие в когнитивных функциях т.д. В наших исследованиях большая активация в этой области относится к задаче на определение поворота синтезированного лица, а не эмоции. Необходимо отметить, что активация в миндалине, которая является важнейшей структурой в системе распознавания лиц, в наших условиях не выявлена ни для одной из задач. Можно предположить, что, во-первых, это связано с тем, что стимулы в различных задачах были одни и те же, менялась только инструкция, а во-вторых, лицо, даже нейтральное, является эмоциональным стимулом (Барабанщиков и др., 2014). Таким образом,

можно предположить, что миндалина была активирована в обеих фазах во всех экспериментальных задачах. Согласно методике проведения фМРТ, карты активации рассчитываются на основе вычитания одной фазы из другой. Соответственно, при вычитании фазы 2 из фазы 1, активация в данной области была усреднена.

На рисунке 11 представлен результат вычитания активности из фазы 2 активности в фазе 1. В результате на рисунке 11 получаем карту активности, совершенно отличную от результирующей карты, полученной при вычитании из фазы 1 фазы 2 (см. рисунок 10).

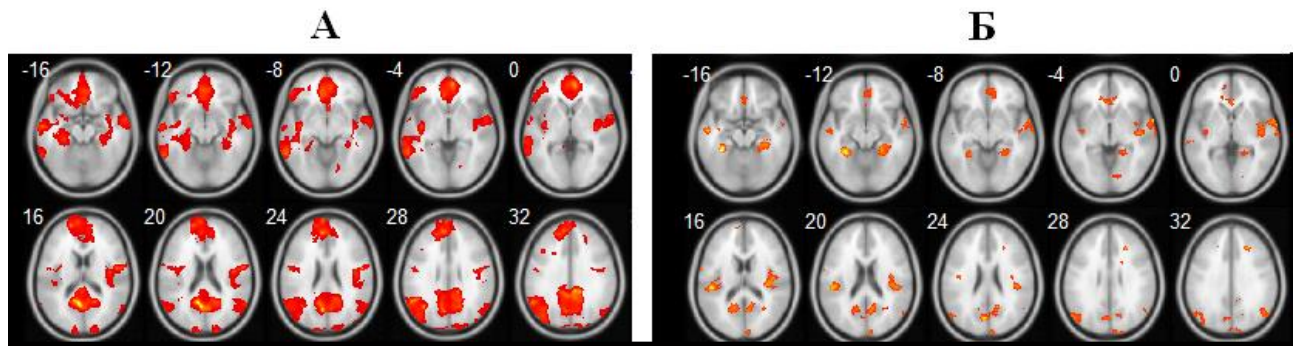


Рисунок 11 – Результирующий уровень активации в результате вычитания активности из фазы 2 активности фазы 1. Усреднение для группы из 24 человек (FDR-corrected, $p=0,05$) в задачах на определение эмоции (А) и поворота (Б) одного и того же набора лиц.

Рисунок активации интерпретируют как проявление некой активности гипотетической нейронной «сети базового режима», «default mode network» (DMN) (Van Overwalle, 2009; Amodio et al., 2006; Brass et al., 2007; De Lange et al., 2008), потому что она наиболее активна при отсутствии заданных и синхронизированных с обработкой внешних раздражителей, в состоянии относительного покоя. Она активна как раз в промежутках между стимуляцией, т.е. ее активность запускается с выключением стимуляции. Аналогичный паттерн функциональных связей наблюдается у человека в условиях отсутствия стимуляции, в состоянии «покоя». Вместе с тем, существует большое количество экспериментальных данных,

подтверждающих активацию этих областей в задачах, связанных с эпизодической памятью (Greccius et al., 2004), представлением себя (Wicker et al., 2003), в условиях социального взаимодействия (Iacoboni et al., 2004), с внутренними активными процессами в нейронных сетях (Черниговская, 2008-2010; Andrews-Hanna et al., 2011). Интересно, как физически один и тот же набор лиц, при изменении инструкции – какая эмоция или какой поворот – приводит к совершенно другой активации этой сети (рисунок 11).

Таким образом, в разных фазах мы наблюдаем отличные карты активации нейронных структур мозга. Необходимо напомнить, что в фазе 2 испытуемым давалась инструкция, отличающаяся от инструкции в фазе 1. Если в фазе 1 требовалось определять эмоцию или поворот лица и нажимать на соответствующую клавишу мыши, то в фазе 2 требовалось поочередно нажимать на правую и левую клавиши мыши в ответ на каждое предъявление лица. Можно предположить, что это более простая инструкция, в результате выполнения которой возникает паттерн активации нейронной сети в «базовом» режиме. Необходимо подчеркнуть, что в фазе 2 предъявлялись нейтральные лица прямо ориентированные относительно саггитальной оси (в фас). Взгляд «глаза в глаза» играет важную роль в социальном взаимодействии людей. Особое место в данном типе взаимодействия отводится работе мимических мышц лица, позволяющих передать как сильные, так и едва уловимые психологические состояния другого человека. Это предположение совпадает с уже известными данными, согласно которым направление взгляда прямо, глаза в глаза, может вызвать активацию данного паттерна (Senju et al., 2009). Таким образом, сравнение нейтральных, но прямо ориентированных лиц (взгляд «глаза в глаза») с эмоциональными, но повернутыми в сторону, могло вызвать существенное перераспределение активности мозговых структур.

Важно подчеркнуть, что отличия наглядны в изображениях результирующих карт активации мозга, когда стимулы были неизменны, а

менялась только инструкция. Так при вычитании активности из фазы 2, которая следовала за фазой 1, связанной с задачей определения эмоции лица, наблюдается обширная активация в зоне медиальной префронтальной коры. А при вычитании активности в фазе 2, которая следовала за фазой 1, связанной с задачей определения поворота лица, подобной активации не наблюдалось. Еще раз подчеркнем, что стимулы в рамках одной фазы не менялись.

Роль медиальной префронтальной коры на данный момент активно обсуждается. Так, принято считать, что данная структура участвует в описании и оценке как своего, так и чужого психического состояния. При этом вентральную часть данной области, чаще всего, связывают с моделированием своего психического состояния, а дорсальную – и своего, и чужого (Van der Meer et al., 2010; Bryan et al., 2012). Особенно интересны исследования, изучающие роль данной области в этиологии клинических расстройств. Так, при заболеваниях, сопровождающихся дефицитом в сфере самопознания, способности понимать чужие убеждения, намерения и чувства других, например, при аутизме (Di Martino et al., 2009), шизофрении (Whitfield-Gabrieli et al., 2009), тревожных расстройствах (Etkin et al., 2010) и депрессии (Savitz et al., 2009), присутствуют дисфункции в зоне медиальной префронтальной коры. Именно эта способность часто нарушается у больных с данными заболеваниями. Таким образом, отличия в активации в фазе 2 напрямую зависели от инструкции (определение эмоции или поворота), которая давалась в фазе 1. Так, можно предположить, что наблюдатели в задаче определения эмоции лица, в отличие от поворота, занимались оценкой психического состояния виртуальных людей по изображению их лиц, предъявляемых в качестве стимулов.

В целом, для центра принятия решения о мимике и повороте лиц характерна активация многих мозговых структур, которая, в свою очередь, предполагает их взаимодействие. Методом оценки локального кровотока во

времени проведен анализ между активированными зонами мозга в 1 и 2 фазах. В каждой фазе зарегистрировано синхронное изменение активности функциональных зон. Показано, что уровень BOLD-сигнала в этих структурах сходным образом модулируется условиями стимуляции – чередованием фаз. Полученные результаты, не смотря на разнородную функциональную специфику указанных областей, позволили усреднить их и сравнить между собой. Результат представлен на рисунке 12.

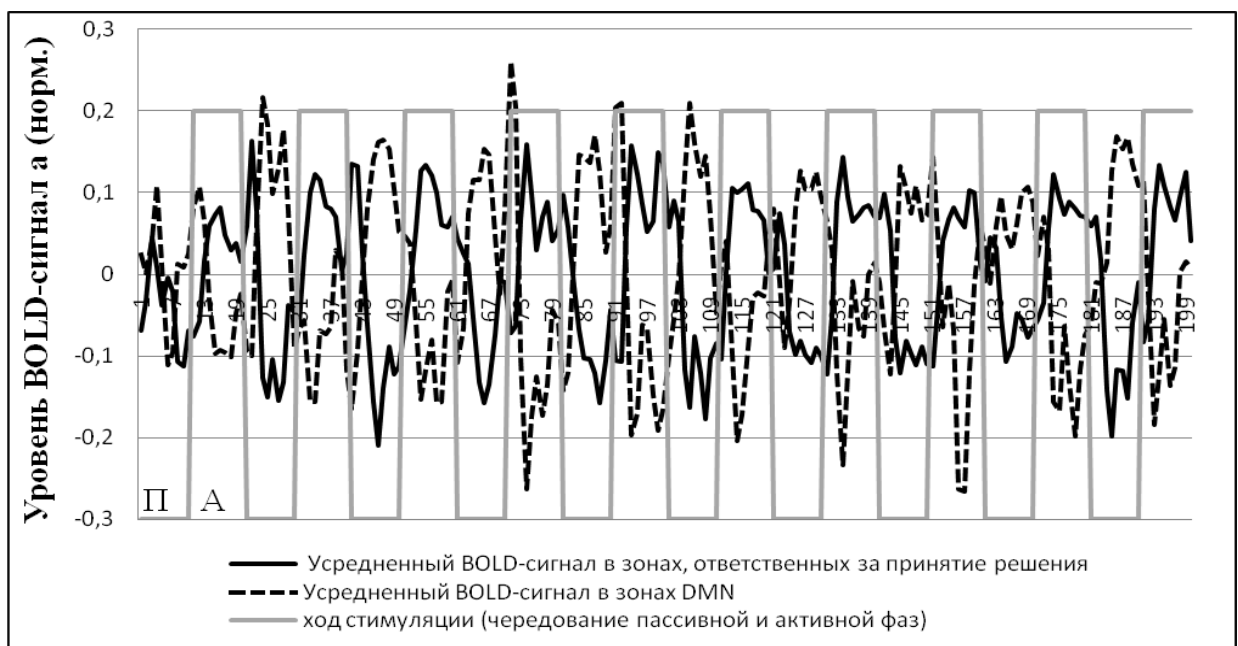


Рисунок 12 – Изменение во времени BOLD-сигналов в оппонентно работающих структурах мозга в фазу 1(А) и 2(П) фазы стимуляции.

Виден оппонентный ход кривых. Причем в фазе 1 уровень локального кровотока выше для зон, ответственных за принятие решения, а в фазе 2 – для зон, ответственных за «сеть базового режима» (DMN). Подчеркнем, что этот принцип является крайне важным в механизме принятия решения в задачах распознавания лиц. Можно предположить, что баланс критериев оценок при принятии решений осуществляется при помощи оппонентного механизма взаимодействия разных нейронных структур, аналогично тем оппонентным механизмам, которые известны в первичных структурах

зрительной системы. В данном исследовании показаны оппонентные отношения на глобальном уровне между различными фазами стимуляции. В действительности, это, возможно, слишком грубые представления, и элементами могут быть куда более мелкие образования. Особо следует подчеркнуть тот факт, что данные системы функционируют не изолированно, а только во взаимодействии друг с другом. Причем, как показал теоретический анализ экспериментальных данных, одна и та же зона головного мозга может включаться в разные системы. Это позволяет предположить, что, во-первых, существует сложная система совместно работающих зон мозга, каждая из которых вносит свой специфический вклад в осуществление психических процессов, а во-вторых, что каждая из этих зон мозга может вовлекаться в реализацию различных функций в зависимости от инструкции и экспериментальных условий. Функциональное построение таких сетей создает паттерн нейронной активности, специфичный для каждой экспериментальной ситуации. Специфичность этого паттерна определяется сначала самой задачей, затем визуальными стимулами – их физическими, геометрическими и семантическими характеристиками, и, наконец, структурами глаза и зрительного мозга, обеспечивающими восприятие мимики человека, оценку положения головы, т.е. средств невербальной коммуникации.

На рисунке 13 изображена схема представительства на поверхности коры головного мозга человека областей, которые были активированы в наших исследованиях, имитирующих условия невербальной коммуникации между испытуемыми.

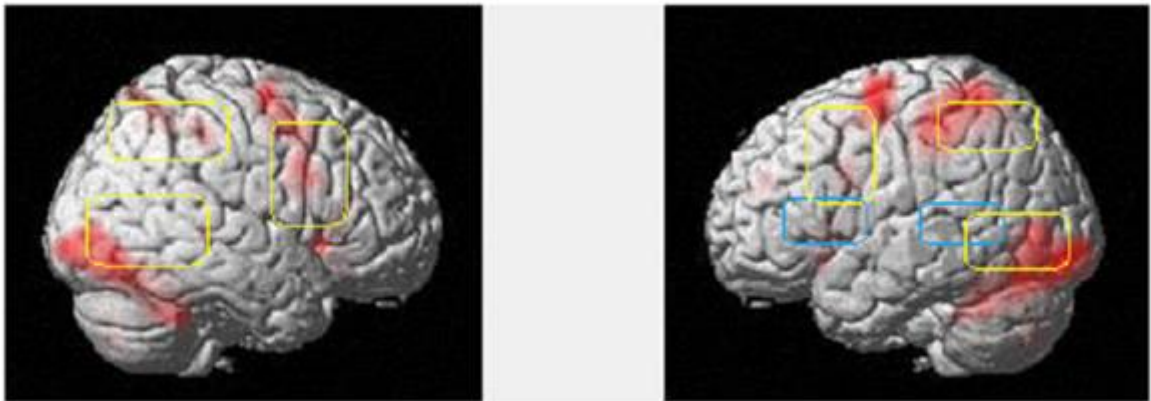


Рисунок 13 – Усредненный уровень активации в активной фазе для группы из 24 человек при $p=0,001$ (FDR-corrected, $p=0,05$) в задаче на определение эмоции изображен красными пятнами на схеме мозга. Желтым цветом обозначены условные границы зон мозга, в которых многими исследователями были найдены «зеркальные нейроны»; синим цветом – общеизвестные зоны Брока и Вернике, расположенные в левом полушарии. Некоторые отличия в положении активированных зон левого и правого полушарий, полученные в нашем исследовании, вероятно можно объяснить наличием речевых зон Брока и Вернике в левом полушарии.

На этой же схеме представлены классические зоны вербальной коммуникации и положение областей, в которых обнаружены так называемые зеркальные нейроны (Rizzolatti, et al., 2001-2010). Именно «зеркальные» нейроны участвуют в обеспечении невербальной коммуникации. Видно, что зоны, обеспечивающие вербальную и невербальную коммуникацию, расположены рядом и перекрывают друг друга. Следовательно, высшие отделы как «Слухового» так и «Зрительного» мозга взаимосвязаны, так как совместно обеспечивают социальное взаимодействие.

Таким образом, на данном этапе удалось установить, что при наблюдении одного и того же лица, но при необходимости оценки эмоционального состояния этого лица, либо определения направления поворота этого же лица возникает специфическая активность основных структур мозга, обеспечивающих распознавание и принятие решений.

Специфичность узора многоуровневой и многоканальной нейронной сети в момент решения испытуемым поставленной перед ним задачи определяется самой задачей, стимулами–изображениями, их физическими, геометрическими и семантическими характеристиками, и, наконец, структурами глаза и зрительного мозга, обеспечивающими восприятие, узнавание и понимание мимики и, естественно, планирования ответных действий. Особый интерес представляет изучение роли инструкции в активации нейронной сети, обеспечивающей принятие решений при работе в идентичных условиях, и изучение факторов, создающих пароксизмы непрерывной деятельности человека. Решение поставленной перед наблюдателем задачи определяется работой нейронных сетей, «собранных» из оппонентных систем разных уровней, от кодирования информации в сетчатке глаза до выделения специфических составляющих пространственно-частотного спектра изображений лица, и принятия решений в норме и при патологии.

Список использованных источников

1. Барабанщиков В.А. Экспрессии лица и их восприятие. М.: ИП РАН, 2012.
2. Барабанщиков В.А., Хозе Е.Г. Восприятие индуцированных эмоциональных экспрессий спокойного лица // Шестая международная конференция по когнитивной науке. Калининград, 2014. С.142-143.
3. Гассовский Л.Н., Никольская Н.А. Движения глаз в процессе непрерывной фиксации точки // Труды Государственного оптического института, 1941. Т. 15. С. 112-120.
4. Глезер В.Д., Подвигин Н.Ф., Леушина Л.И., Невская А.А. Зрительное опознание и его нейрофизиологические механизмы. Л.: Наука, 1975. 271 с.
5. Жеребко А.К., Луцив В.Р. Согласованная фильтрация в естественных и искусственных нейронных сетях // Оптический журнал, 1999. Т. 66. № 9. С. 69-72.
6. Кемпбелл Ф.В., Шелепин Ю.Е. Возможности фовеолы в различении объектов // Сенсорные системы, 1990. Т. 4. № 2. С. 181-185.
7. Логунова Е.В., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е. Моделирование работы пространственно-частотных фильтров при восприятии сложных динамических сцен // Оптический журнал, 2014. Т. 81. № 11.
8. Михайлова Е.С. Нейробиологические основы опознания человеком эмоций по лицевой экспрессии // Журн. Выс. нервн. деят., 2005. Т 55. № 2. С. 149-162.
9. Мурыгин К.В.. Оптимизация габоровских вейвлет-преобразований для задачи распознавания человека по изображению лица // Искусственный интеллект, 2003. № 4. С. 223-229.
10. Подвигин Н.Ф., Макаров Ф.Н., Шелепин Ю.Е. Элементы структурно-функциональной организации зрительно-глазодвигательной системы. Л.: Наука, 1986. 252 с.

11. Толстой Л.Н. Детство, отрочество, юность. 1852 // Собр. соч. Т. 1. М.: Худож. лит., 1952. С. 15.
12. Филд Д. Согласованные фильтры, вейвлеты и статистика натуральных сцен // Оптический журнал, 1999. Т. 66. №9. С. 25-36.
13. Цуккерман И.И. О согласовании пространственно-частотных фильтров зрительного анализатора со статистикой изображений // Биофизика, 1978. Т. XXIII. Вып. 6. С. 1108–1109.
14. Цуккерман И.И., Шостацкий Н.Н. Анизотропия пространственно-частотной характеристики зрения // Физиология человека, 1978. Т. 4. № 1. С. 17–20.
15. Черниговская Т.В. От коммуникационных сигналов к языку и мышлению человека: эволюция или революция // Рос. физиол. журн. И.М. Сеченова, 2008 а. Т. 94. № 9. С. 1017–1028.
16. Черниговская Т.В. Человеческое в человеке: сознание и нейронная сеть // Проблема сознания в философии и науке, 2008 б.
17. Черниговская Т.В. Мозг и язык: врожденные модули или обучающаяся сеть? // МОЗГ. Фундаментальные и прикладные проблемы / Под ред. А.И. Григорьева. М.: НАУКА, 2010. С. 117–127.
18. Чихман В.Н., Шелепин Ю.Е., Фореман Н., Пэсмор П. Восприятие фрагментированных изображений трехмерных объектов при изменении угла наблюдения. // Российский физиологический журнал, 2009. Т. 95. № 4. С. 324-334.
19. Шелепин Ю.Е. Руководство по биофизике. Ред. В.О. Самойлов. Политехника, 2007.
20. Шелепин Ю.Е., Колесникова Л.Н., Левкович Ю.И. Визоконтрастометрия. Л.: Наука, 1985. 105 с.
21. Шелепин Ю.Е., Бондарко В.М., Данилова М.В. Конструкция фовеолы и модель пирамидальной организации зрительной системы // Сенсорные системы, 1995. Т. 9. № 1. С. 87-97.

22. Шелепин Ю.Е., Бондарко В.М. Разрешающая способность и дискретизация изображений в зрительной системе // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова, 2002. Т. 88. № 9.
23. Шелепин Ю.Е., Фокин В.А., Хараузов А.К., Фореман Н., Пронин С.В., Вахрамеева О.А., Чихман В.Н. Локализация методами нейрoиконики механизмов принятия решений об упорядоченности текстур // Оптический журнал, 2011. Т. 78. С.57-69.
24. Шелепин Ю.Е., Фокин В.А., Мееньшикова С.В., Борачук О.В., Коскин С.А., Соколов В.А, Пронин С.В., Хараузов А.К., Васильев П.П., Вахрамеева О.А. Методы иконики и методы картирования мозга в оценке функционального состояния зрительной системы // Сенсорные системы, 2014. № 2.
25. Aharon I., Etcoff N., Ariely D., Chabris C.F., O'Connor E. Beautiful faces have variable reward value: fMRI and behavioral evidence // *Neuron*. 2001. V. 32. pp. 537–551.
26. Alekcander I. Barnett Piers. Thinking machines // Oxford University press. 1987.
27. Allison T., Puce A., McCarthy G. Social perception from visual cues: role of the STS region // *Trends Cogn.* 2000. pp. 267-278.
28. Amodio D.M., Frith C.D. Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition // *Nat. Rev. Neurosci.* 2006. V. 7. pp. 268-277.
29. Andrews-Hanna JR. The Brain's Default Network and its Adaptive Role in internal Mentation // *The Neuroscientist*. 2011. V. 18. № 3. pp. 251-270.
30. Betts LR., Wilson HR. Heterogeneous Structure in face-selective Human Occipito-temporal Cortex // *J. Cogn Neuroscience*. 2010. V. 22. № 10. pp. 2276-2288.
31. Brass M., Schmitt R.M., Spengler S., Gergely G. (2007). Investigating action understanding: inferential processes versus action simulation // *Curr. Biol.* 2007. V. 17. pp. 2117-2121.

32. Breiter H.C., Etcoff N.L., Whalen P.J., Kennedy W.A., Rauch S.L. (1996) Response and habituation of the human amygdala during visual processing of facial expression // *Neuron*. 1996. V. 17. pp. 875-887.
33. Bryan T.D., Hedy K., Kevin N.O. A Meta-Analysis of Functional Neuroimaging Studies of Self and Other Judgments Reveals a Spatial Gradient for Mentalizing in Medial Prefrontal Cortex // *J. Cogn.Neurosci.* 2012. V. 24 (8). pp. 1742-1752.
34. Campbell F., Robson J. Application of Fourier analyses to the visibility of gratings // *J. Physiol.* 1968. V. 197. pp. 551-556.
35. Campbell F.W. How much of the information falling on the retina reaches the visual cortex and how much is stored in the visual memory? // *Pontificae academiae scientiarum scripta vari.* 1985. V. 54. pp. 83-95.
36. Campbell F.W., Gubisch R.W. Optical quality of the human eye // *J. Physiol.* 1986. V. 186. pp. 558-578.
37. Campbell F.W., Shelepin Yu.E. The mechanics of the foveola and its role in defining an object // *Perception*. 1989. Supple. V. 12. № 4. p. 532 (A50).
38. Canessa N., Alemanno F., Riva F., Zani A., Proverbio A.M., Mannara N. The neural bases of social intention understanding: the role of interaction goals. 2012. V. 7. pp.1-11.
39. Conty L., N'Diaye K., Tijus C., George N. When eye creates the contact! ERP evidence for early dissociation between direct and averted gaze motion processing // *Neuropsychologia*. 2007. V. 45(13). pp. 3024-203.
40. Dakin S.C., Watt, R.J. Biological «bar codes» in human faces // *Journal of Vision*. 2009. V. 9(4). pp. 1-10.
41. De Lange F.P., Spronk M., Willems R.M., Toni I., and Bekkering H. Complementary systems for understanding action intentions // *Curr. Biol.* 2008. V. 18. pp. 454-457.
42. Dinstein I., Thomas C., Behrmann M., and Heeger D. (2008). A mirror up to nature // *Curr. Biol.* 2008. V. 18. pp. 13-18.

43. Di Martino A., Ross K., Uddin L.Q., Sklar A.B., Castellanos F.X., Milham M.P. Functional brain correlates of social and nonsocial processes in autism spectrum disorders: an activation likelihood estimation meta-analysis // *Biol. Psychiatry*. 2009. V. 65(1). pp. 63-74.
44. Di Pellegrino G., Fadiga L., Fogassi L., Gallese V., Rizzolatti G. Understanding motor events: a neurophysiological study // *Exp. Brain Res.* 1992. V. 91. pp. 176-180.
45. Etkin A, Wager T.D. Brain systems underlying anxiety disorders: a view from neuroimaging / Simpson H.B., Schneier F., Neria Y., Lewis-Fernandez R., editors. *Anxiety Disorders: Theory, Research and Clinical Perspectives*. Cambridge. UK: Cambridge University Press. 2010.
46. Fransson P. How default is the default mode of brain function? Further evidence from intrinsic BOLD signal fluctuations // *Neuropsychologia*. 2006. V. 44. pp. 2836-2845.
47. Foreman N. Correlates of performance on the Gollin and Mooney tests of visual closure. *J Gen. Psychol.* 1991. Jan; 118(1), pp.13-20.
48. Fusar-Poli P., Placentino A., Carletti F., Landi P., Allen P. Functional atlas of emotional faces processing: A voxel-based meta-analysis of 105 functional magnetic resonance imaging studies // *J. Psychiatry Neurosci.* 2009. V. 34. pp. 418-432.
49. Gallese V., Fadiga L., Fogassi L., Rizzolatti G. Action recognition in the premotor cortex // *Brain*. 1996. V. 119. pp. 593-609.
50. Gallese V., Keysers C., Rizzolatti G. A unifying view of the basis of social cognition // *Trends Cogn. Sci.* 2004. V. 8. pp. 396-403.
51. Grafton S.T. Embodied cognition and the simulation of action to understand others // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2009. V. 1156. pp. 97-117.
52. Greicius M.D., Menon V. Default-mode activity during a passive sensory task: uncoupled from deactivation but impacting activation // *J. Cogn. Neurosci.* 2004. V. 16. pp. 1484-1492.

53. Gusnard D.A., Raichle M.E. Searching for a baseline: functional imaging and the resting human brain // *Nat. Rev. Neurosci.* 2001. V. 2. pp. 685-694.
54. Harris A., Aguirre G.K. The representation of parts and wholes in face-selective cortex // *J. Cogn. Neurosci.* 2008. V. 20. pp.863-878.
55. Haxby J.V., Hoffman E.A., Gobbini M.I. Distributed human neural systems for face perception // *Trends Cogn. Sci.* 2000. V. 4. pp. 223-233.
56. Haxby J., Gobbini M. Distributed neural systems for face perception // *The Oxford handbook of face perception* / Ed. A. Calder. UK: Oxford Univ. Press. 2011. pp. 93-110.
57. Hickok G. Eight problems for the mirror neuron theory of action understanding in monkeys and humans // *J. Cogn. Neurosci.* 2009. V. 21. pp. 1229-1243.
58. Hyvarinen J., Shelepin Yu.E. Distribution of visual and somatic functions in the parietal associative area 7 of the monkey. *Brain Research*, 1979, vol. 169. pp. 561-564.
59. Iacoboni M., Lieberman M.D., Knowlton B.J., Molnar-Szakacs I., Moritz M., Throop C.J. Watching social interactions produces dorsomedial prefrontal and medial parietal BOLD fMRI signal increases compared to a resting baseline // *Neuroimage.* 2004. V. 21. pp. 1167-1173.
60. Iacoboni M. Neural mechanisms of imitation // *Curr Opin Neurobiol.* 2005. V. 15. pp. 632-637.
61. Ishai A., Haxby J.V., Ungerleider L.G. Visual imagery of famous faces: effects of memory and attention revealed by fMRI // *Neuroimage.* 2002. V. 17. pp. 1729-1741.
62. Ishai A. Lets face its a cortical network // *Neuroimage.* 2008. V. 40. pp. 415-419.
63. Johnson M.H. Subcortical face processing // *Nature Reviews Neuroscience.* 2005. V. 6. pp. 766-774.

64. Juan E., Frum C., Bianchi-Demicheli F., Wang Y-W., Lewis J.W., Cacioppo S. Beyond human intentions and emotions // *Front. Hum. Neurosci.* 2013.
65. Kanwisher N. The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception // *J. Neurosci.* 1997. V. 17. pp. 4302-4311.
66. Keysers C., Perrett D.I. Demystifying social cognition: A Hebbian perspective // *Trends Cogn. Sci.* 2004. V. 8. pp. 501-507.
67. Krasil'nikov N.N., Shelepin Yu.E. Functional model of the visual system // *Journal of Optical Technology.* 1997. V. 64. I. 2.
68. Krasil'nikov N.N., Shelepin Yu.E., Krasil'nikova O.I. The use of the principles of the optimal observer in modelling the human visual system // *Journal of Optical Technology.* 1999. V. 66. I. 9. pp. 782.
69. Leech R., Sharp D.J. The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease // *Brain.* 2014. V. 137 (1). pp. 12-32.
70. Leslie K.R., Johnson-Frey S.H., Grafton S.T. Functional imaging of face and hand imitation: towards a motor theory of empathy // *Neuroimage.* 2002. V. 21 (2). pp. 601-607.
71. Leveroni C.L., Seidenberg M., Mayer A.R., Mead L.A., Binder J.R. Neural systems underlying the recognition of familiar and newly learned faces // *J. Neurosci.* 2000. V. 20. pp. 878-886.
72. Lewis J.W., Phinney R.E., Brefczynski J.A., DeYoe E.A. Lefties get it “right” when hearing tool sounds // *J. Cogn. Neurosci.* 2006. V. 18. pp. 1314-1330.
73. Liu J., Harris A., Kanwisher N. Perception of face parts and face configurations: an fMRI study // *J. Cogn. Neurosci.* 2010. pp. 203-2011.
74. Mahon B.Z., Caramazza A. A critical look at the embodied cognition hypothesis and a new proposal for grounding conceptual content // *J. Physiol.* 2008. V. 102. pp. 59-70.

75. McKiernan K.A., Kaufman J.N., Kucera-Thompson J., Binder J.R. A parametric manipulation of factors affecting task-induced deactivation in functional neuroimaging // *J. Cogn. Neurosci.* 2003. V. 15. pp. 394-408 (2003).
76. Morris J.S., Frith C.D., Perrett D.I., Rowland D., Young A.W., et al. (1996) A differential neural response in the human amygdala to fearful and happy facial expressions // *Nature*. V. 383. pp. 812-815. 1996.
77. Mooney C.M. A factorial study of closure. *Canadian Journal of Psychology / Revue canadienne de psychologie*. Vol. 8(2), Jun 1954, pp. 51-60. <http://dx.doi.org/10.1037/h0083599>
78. Nichols D.F., Betts L.R., Wilson H.R. Decoding of faces and face components in face-sensitive human visual cortex // *Front Psychol.* 2010.
79. Niedenthal P.M. Embodying emotion // *Science*. V. 316. pp. 1002-1005. 2007.
80. O'Doherty J., Winston J., Critchley H., Perrett D., Burt D.M. Beauty in a smile: the role of medial orbitofrontal cortex in facial attractiveness // *Neuropsychologia*. 2003. V. 41. pp. 147-155.
81. Privitera C.M., Carney T., Kleina S., Aguilarb M. Analysis of microsaccades and pupil dilation reveals a common decisional origin during visual search // *Vision Research*. 2014. V. 95. pp. 43-50.
82. Ramon M., Dricot L., Rossion B. Personally familiar faces are perceived categorically in face-selective regions other than the FFA // *Eur. J. Neurosci.* pp. 1587-1598. 2010.
83. Raichle M.E., MacLeod A.M., Snyder A.Z., Powers W.J., Gusnard D.A., Shulman G.L. A default mode of brain function // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* V. 98. pp. 676-682. 2001.
84. Rizzolatti G., Fogassi L., and Gallese V. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action // *Nat. Rev. Neurosci.* V. 2. pp. 661-670. 2001.

85. Rizzolatti G., and Craighero L. The mirror-neuron system // *Annu. Rev. Neurosci.* V. 27. pp. 169-192. 2004.
86. Rizzolatti G., and Sinigaglia C. (2008). Further reflections on how we interpret the actions of other // *Nature.* 2008. V. 455. p. 589.
87. Rizzolatti G., and Sinigaglia C. The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations // *Nat. Rev. Neurosci.* 2010. V. 11. pp. 264-274.
88. Rodriguez E., George Jean-Philippe, Lachaux N., Martinerie J., Renault B. & Varela F.J. Perception's shadow: long distance synchronization of human brain activity // *Nature*, vol. 397. pp. 430-433, 4 February 1999. www.nature.com
89. Savitz J., Drevets W.C. Bipolar and major depressive disorder: neuroimaging the developmental-degenerative divide // *Neurosci Biobehav. Rev.* 2009. V. 33 (5). pp. 699-771.
90. Senju A., Johnson M.H. Eye contact effect: mechanism and development // *Trends Cogn. Sci.* 2009. V. 13 (3). pp. 127-134.
91. Schubotz R., Cramon D.Y. Functional organization of the lateral premotor cortex: fMRI reveals different region activated by anticipation of object properties, location and speed // *Cognitive Brain Research.* 2001. V. 11 (1). pp. 97-112.
92. Shelepin Yu.E., Pavlov N.N. Spatial discreteness, image filtration, and Gestalt construction // *Perception.* 1989. V. 12. № 4. pp. 537 A(55).
93. Shelepin Yu.E., Pavlov N.N., Danilova M.V. The spatial organisation of the human fovea mosaic // *Perception.* 1989. V. 12. № 4. pp. 538 (A56).
94. Takashi Hanakawa, Manabu Honda, Nobukatsu Sawamoto, Tomohisa Okada, Yoshiharu Yonekura, Hidena Fukuyama and Hiroshi Shibasaki. The Role of Rostral Brodmann Area 6 in Mental-operation Tasks: an Integrative Neuroimaging Approach // *Cerebral Cortex.* Volume 12, Issue 11. pp. 1157-1170. 2002.

95. Tamietto M., de Gelder B. Neural bases of the non-conscious perception of emotional signals // *Nature Reviews Neuroscience* AOP. 2010.
96. Thompson P. Margaret Thatcher: a new illusion // *Perception*. 1980. V. 9. № 4. pp. 483-484.
97. Turella L., Pierno A.C., Tubaldi F., and Castiello U. Mirror neurons in humans: consisting or confounding evidence // *Brain Lang.* 2009. V. 108. pp. 10-21.
98. Unsworth C.A. Cognitive and Perceptual Dysfunction. In T.J. Schmitz & S.B. O'Sullivan (Eds.). *Physical Rehabilitation*. Philadelphia, F.A.: Davis Company. 2007.
99. Van der Meer L., Costafreda S., Aleman A., David A.S. Self-reflection and the brain: a theoretical review and meta-analysis of neuroimaging studies with implications for schizophrenia // *Neurosci Biobehav Rev.* 2010 V. 34 pp. 935-946.
100. Van Overwalle F. Social cognition and the brain: a meta-analysis // *Hum. Brain Mapp.* 2009. V. 30. pp. 829-858.
101. Verhallen R.J., Bosten J.M., Goodbourn P.T., Bargary G., Lawrance-Owen A.J., Mollon J.D. An online version of the Mooney Face Test: phenotypic and genetic associations. // *Neuropsychologia*. 2014; 63: pp. 19-25. doi: 10.1016/J.Neuropsychologia.2014.08.011.7.
102. Watson A.B., Barlow H.B., Robson J.G. What does the eye see best? // *Nature*. 1983. V. 302. № 5907, pp. 419-422.
103. Watson A.B. The Spatial Standard Observer: A human vision model for display inspection. // *SID Symposium Digest of Technical Papers*. 2006. V. 37. pp. 1312-1315.
104. Watson A., Ramirez C.V., Salud E. Predicting Visibility of Aircraft // *PLoS ONE*. 2009. V. 4. № 5594. pp. 1-16.

105. Weiman C. Efficient Discrete Gabor Functions for Robot Vision // SPIE Conference on Wavelet Applications. Orlando, FLA. 1994. V. 2242. pp. 148-160.
106. Whitfield-Gabrieli S., Thermenos H.W., Milanovic S., Tsuang M.T., Faraone S.V., McCarley R.W. Hyperactivity and hyperconnectivity of the default network in schizophrenia and in first-degree relatives of persons with schizophrenia // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2009. V. 106(4). pp. 1279-1284.
107. Wicker B., Ruby P., Royet J.P., Fonlupt P. A relation between rest and the self in the brain // Brain Res. Rev. 43. pp. 224-230. 2003.