



ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Ермаков П.Н., Бабенко В.В., Кульба С.Н.**Отражение в параметрах бимодальных
вызванных потенциалов соотношения эффективности
зрительного и слухового входов**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ в рамках научно-исследовательского проекта РГНФ («Отражение в параметрах связанных с событием потенциалов эффективности зрительно-слуховой интеграции»), проект № 06-06-00314а.

В работе использован феномен рассогласования бимодального связанного с событием потенциала и суммы унимодальных ответов. Ставилась цель определить, как связана эффективность бимодальной интеграции с амплитудой рассогласования в группах испытуемых, отдающих приоритет либо зрительной, либо слуховой информации. Обнаружено, что в сравниваемых группах выявленные зависимости носят противоположный характер. Делается заключение, что амплитуда рассогласования коррелирует с эффективностью интеграции, а эффективность интеграции тем выше, чем более выражен приоритет зрительного входа над слуховым.

Ключевые слова: межсенсорная интеграция, связанные с событием потенциалы, амплитуда рассогласование, ведущий анализатор.

Когда человек видит какой-либо объект или слышит издаваемые им звуки, в мозге акцентируется образ, который не является чисто зрительным или слуховым, а сочетает в себе описания данного объекта по всем возможным модальностям. Фактически можно сказать, что все хранящиеся в памяти образы полисенсорны. Однако сведения о механизмах формирования таких полисенсорных образов крайне недостаточны. Сегодня мы не располагаем информацией о том, по каким принципам организовано взаимодействие сенсорных систем, какие области мозга участвуют в интегрировании и хранении гетеросенсорной информации.

Попытки локализовать в коре область, ответственную за межсенсорную интеграцию, не дали однозначного ответа на этот вопрос. Микроэлектродные исследования на обезьянах выявили наиболее высокую концентрацию полисенсорных нейронов в префронтальной коре [3, 8, 10]. Кроме того, у обезьян удаление именно левой префронтальной коры сильнее всего сказывалось на возможностях зрительно-слуховой ассоциации. В то же время, использование магнитоэнцефалографии свидетельствовало о локализации очага зрительно-слухового



взаимодействия, по одним данным, в проекционной зрительной коре [4], а по другим - в правой теменно-височной области [9]. Данные же ЯМР-томографии указывали на границу височной и теменной коры, нижнюю лобную извилину, островок, левую сингулярную и добавочные моторные зоны правого полушария [6]. Были также предприняты попытки ответить на этот вопрос с использованием вызванных потенциалов [7].

Обращает на себя внимание, что все эти работы ставили своей целью определить зоны коры, в которой значения регистрируемого параметра максимальны. Мы же посчитали целесообразным определить области, в которых показатель, отражающий интегративные процессы, в наибольшей степени коррелирует с реальной эффективностью межсенсорной интеграции.

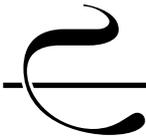
В своем предыдущем исследовании [1] мы использовали феномен рассогласования бимодального связанного с событием потенциала (ССП) и суммы унимодальных ответов. Нами исследовалась зависимость амплитуды рассогласования от эффективности зрительно-слуховой интеграции. Полученные результаты указывают на то, что эффективность межсенсорной интеграции коррелирует с амплитудой рассогласования. При этом, чем выше эффективность интеграции, тем больше фокус рассогласования смещается из затылочных в передние отделы коры.

Вместе с тем, анализ полученных ранее результатов показал, что разные испытуемые, решая задачу опознания бимодальных образов, по-разному использовали зрительный и слуховой входы. Эксперимент был организован таким образом, что предварительно подбирались параметры унимодальной стимуляции и маскировки, обеспечивающие примерно одинаковый уровень опознания и зрительных и слуховых стимулов (на уровне порядка 35-40 % правильных ответов). Однако затем, в ходе самого эксперимента, когда в случайном порядке чередовались зрительные, слуховые и бимодальные стимулы, испытуемые улучшали свои показатели по одной из сенсорных систем и снижали по другой. То есть они демонстрировали предпочтение в использовании определенного сенсорного входа (зрительного или слухового). Это, согласно Д. Канеману [2], связано с необходимостью распределить обрабатывающие ресурсы между модальностями. И такое распределение часто бывает непропорциональным.

В данной работе мы поставили цель определить, как связана эффективность бимодальной интеграции с амплитудой рассогласования ССП в группах испытуемых, отдающих приоритет либо зрительной, либо слуховой информации.

МЕТОДИКА

Аппаратура. Основу экспериментальной установки составлял персональный компьютер с процессором Celeron 350 мГц, монитором с диагональю 15" (1024 x 768 пикселей, 85 Гц), видеокартой Dimond A200 и звуковой картой Creative Live 5.5. Звуковые сигналы подавались через головные телефоны Philips SBC HP800 (Голландия). Для регистрации ЭЭГ использовали восемь каналов биоусилителя с уровнем собственных шумов 1 мкВ и полосой пропускания от 0.3 до 30 Гц.



Стимуляция. Нами был сформирован алфавит образов, состоящий из пяти реальных объектов: поезд, автомобиль, самолет, кошка, собака. Каждый из образов был представлен зрительным и звуковым стимулом.

Зрительные стимулы представляли собой темные контурные рисунки на белом фоне. Все они были одинакового размера и вписывались в условный круг диаметром 1.5 угл. град. Изображения подавались на экран компьютера и были синхронизованы с кадровой разверткой. Контраст (0.15 - 0.30) и длительность (35-60 мс) зрительных стимулов подбирали индивидуально для каждого испытуемого таким образом, чтобы вероятность опознания в данном алфавите образов была в пределах 0.3-0.4.

Маской для зрительных стимулов служила суперпозиция всех используемых изображений. Ее предъявляли на 250 миллисекунд сразу после прекращения действия стимула. Контраст маски линейно снижался до 0 в течение последних 100 мс.

Стимуляция осуществлялась бинокулярно с расстояния 115 см. Фоновая яркость экрана составляла 60 кд/м². Фоновое освещение в экспериментальной камере находилось на уровне 20 лк.

Звуковые стимулы были представлены фрагментами записей реальных звуков, издаваемых указанными объектами. Фрагменты были близки по спектральным характеристикам и выровнены по интенсивности (30 дБ над порогом) и длительности (500 мс).

Маской для звуковых стимулов служила суперпозиция всех используемых звуков. Ее подавали одновременно со стимулом. Интенсивность звукового сигнала линейно снижалась до 0 в течение последних 250 мс.

Звуковая стимуляция осуществлялась бинаурально. Вероятность опознания слуховых стимулов также устанавливалась на уровне 0.3-0.4. Для этого индивидуально подбирали необходимую интенсивность маски.

Регистрация. ЭЭГ регистрировали с поверхности головы в восьми монополярных отведениях (*F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2*) в соответствии со стандартной схемой 10/20. В качестве референта использовали объединенный электрод на мочках ушей. Сигнал оцифровывался 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем с частотой квантования 200 Гц и фиксировался на жестком диске компьютера.

Процедура. Зрительные, слуховые и бимодальные стимулы предъявлялись с интервалом 4-6 с в случайной последовательности. В задачу испытуемого входило опознание предъявляемых образов. Испытуемый называл образ после сигнала экспериментатора. Предварительно каждый испытуемый знакомился с наборами зрительных и слуховых стимулов. Затем индивидуально подбирали параметры стимуляции, которые обеспечивали указанную выше вероятность опознания унимодальных стимулов.

Обработка. В отсроченном режиме времени при визуальном контроле выбирали безартефактные фрагменты записи ЭЭГ (100 мс до стимула и 500 мс после стимула). Зрительные, слуховые и бимодальные ССП получали путем усреднения 100 безартефактных фрагментов ЭЭГ. Усреднение проводили независимо от



правильности опознания. Нулевую линию для всех ССП определяли по среднему уровню предстимульного отрезка ЭЭГ.

Затем суммировали ССП, полученные на звуковую и слуховую унимодальную стимуляцию. Суммарная кривая вычиталась из ССП на бимодальные стимулы. В результате для каждого отведения получали кривую рассогласования. Индивидуальные кривые рассогласования усредняли по общей группе испытуемых и по вновь сформированным группам (см. ниже) с одновременным расчетом доверительного интервала на 5 %-ном уровне значимости.

По результатам (психофизическим) каждого эксперимента мы получали также значения вероятностей опознания испытуемым зрительных (p_z), слуховых (p_c) и бимодальных (p_{zc}) стимулов. На основании этих значений вычисляли показатели «идеального наблюдателя» ($p_{ин}$): вероятность опознания бимодальных стимулов, которая потенциально может быть достигнута при интеграции решений, принятых независимо зрительным и слуховым анализаторами. Этот показатель вычисляли по известной формуле, принятой для расчета вероятности появления независимых событий:

$$p_{ин} = p_z + p_c - p_z * p_c$$

Эффективность зрительно-слуховой интеграции (\mathcal{E}) оценивали нами по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = 1 - \frac{p_{ин} - p_{zc}}{p_{ин} - p_{сл}}$$

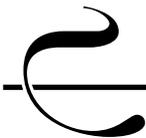
где $p_{сл}$ – вероятность случайного угадывания (в наших экспериментах $p_{сл} = 0.2$).

Разность $p_{ин} - p_{сл}$ задает коридор значений, в котором может находиться экспериментально полученная вероятность p_{zc} . Разность $p_{ин} - p_{zc}$ указывает на положение p_{zc} в этом коридоре.

Эффективность стремится к единице при уменьшении разности между теоретической и экспериментальной вероятностью и достигает ее, когда p_{zc} становится равной $p_{ин}$. Если же результаты испытуемого по каждому сенсорному входу окажутся на уровне случайного угадывания, то и эффективность интеграции будет равна нулю.

Связь амплитуды рассогласования в каждом отведении с эффективностью интеграции оценивали по группе испытуемых с помощью корреляционного анализа.

Испытуемые. В экспериментах приняли участие 25 человек обоего пола в возрасте от 19 до 22 лет без патологий зрения и слуха. На основании психофизических результатов проведенных экспериментов были сформированы 2 группы по 10 человек в соответствии с их показателями распознавания мономодальных стимулов. В первую группу вошли лица, у которых вероятность опознания зрительных стимулов была существенно выше вероятности опознания слуховых стимулов. Во вторую, напротив, те, у кого была выше вероятность опознания слуховых стимулов. Дальнейшая обработка и анализ осуществлялись внутри сформированных групп.



Все испытуемые были проинформированы о процедуре проводимых испытаний, убеждались в безопасности экспериментов для здоровья и давали согласие на участие в исследованиях. Исследования выполняли с соблюдением этических норм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе каждого из 25 экспериментов в 8 отведениях регистрировались ССП в ответ на случайно чередующиеся зрительные, слуховые и бимодальные стимулы. После вычитания из бимодального ССП кривой, отражающей сумму унимодальных ответов, в каждом из отведений для всех испытуемых были получены индивидуальные кривые рассогласования. Затем полученные кривые были усреднены по общей группе испытуемых (рис. 1).

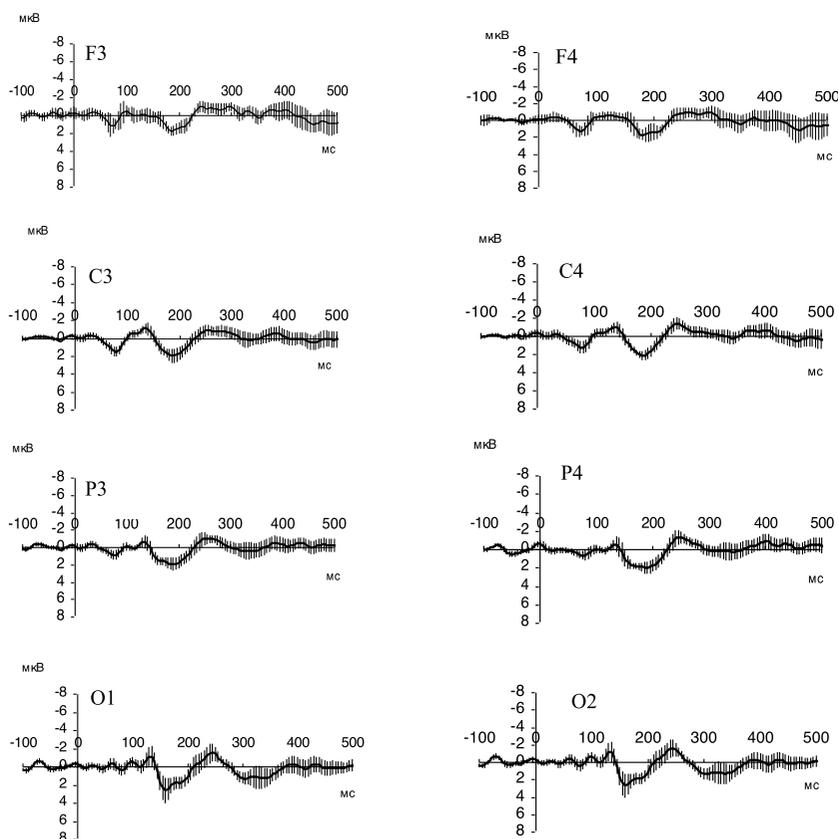


Рис. 1. Разница бимодального ССП и суммарной кривой в разных отведениях, усредненная по всей группе испытуемых. Вертикальными линиями на кривых показаны доверительные интервалы на 5%-ном уровне значимости



Как видно из приведенного рисунка, рассогласования имеют место во всех пунктах отведения, возникают с весьма коротким латентным периодом (ЛП), но более выраженными становятся после 150-й миллисекунды.

Начало первого компонента рассогласования совпадает с началом бимодального ССП, то есть имеет ЛП порядка 60-70 мс, а вся его протяженность составляет не более 10-15 мс. Его возникновение обусловлено снижением амплитуды первой негативной волны бимодального ССП по сравнению с суммарной кривой. Все последующие компоненты рассогласования, возникающие в период со 130-й до 300 мс, отражают увеличение амплитуды более поздних волн бимодального ССП. Речь, таким образом, идет о двух разнонаправленных процессах. Первый, короткий, локализован в ограниченной области ($F4$, $C3$, $C4$). Второй, длительный, выявляется во всех отведениях и выражен значительно сильнее. Этот результат получен на общей группе испытуемых.

Затем все испытуемые были проранжированы нами в соответствии с их индивидуальными соотношениями вероятностей распознавания унимодальных зрительных и слуховых стимулов. На одном конце ряда оказались испытуемые с наибольшей разницей между r_c и r_z , на другом конце – с наибольшей разницей между r_z и r_c . По 10 испытуемых с каждой стороны ряда образовали две группы: тех, кто отдает предпочтение слуховой информации и тех, кто в большей мере ориентируется на зрительные сигналы. Далее анализ полученных результатов проводился для каждой группы отдельно.

В предыдущей работе была установлена прямая связь между амплитудой рассогласования ССП и эффективностью зрительно-слуховой интеграции. Теперь мы определили, как эта связь проявляется в двух сравниваемых группах.

Сначала мы установили, как в разных отведениях амплитуда рассогласования коррелирует с эффективностью зрительно-слуховой интеграции. Полученные результаты представлены в таблице 1.

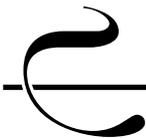
Таблица 1

*Корреляция между эффективностью бимодальной интеграции
и амплитудой рассогласования ССП*

Области коры	Преобладание зрительного входа		Преобладание слухового входа	
	левая	правая	левая	правая
Лобная кора	0,81*	0,58	-0,62	-0,44
Височная кора	0,82*	0,54	-0,15	-0,11
Теменная кора	0,53	0,44	-0,28	-0,74*
Затылочная кора	0,13	0,35	-0,45	-0,11

*Звездочкой отмечены статистически достоверные значения ($p \leq 0,05$).

Сразу же обращает на себя внимание очевидный факт. У испытуемых, отдающих предпочтение зрительной информации, корреляция между амплитудой



рассогласования и эффективностью бимодальной интеграции положительная. Напротив, у тех испытуемых, которые отдают предпочтение слуховой информации, связь носит отрицательный характер.

В первой группе испытуемых связь выше в левом полушарии, во второй – в правом. У тех, кто опирается на зрительную информацию, корреляция наиболее выражена в лобной и височной коре. У тех, кто ориентируется на слуховой вход, связь максимальна в теменной коре.

Полученные результаты хорошо иллюстрируются графиками, показанными на рис. 2.

Если обобщить полученные результаты, то следует констатировать, что в двух сравниваемых группах выявленные зависимости носят противоположный характер. При этом корреляция между амплитудой рассогласования и эффективностью интеграции существенно выше в группе тех, кто отдает предпочтение зрительной информации.

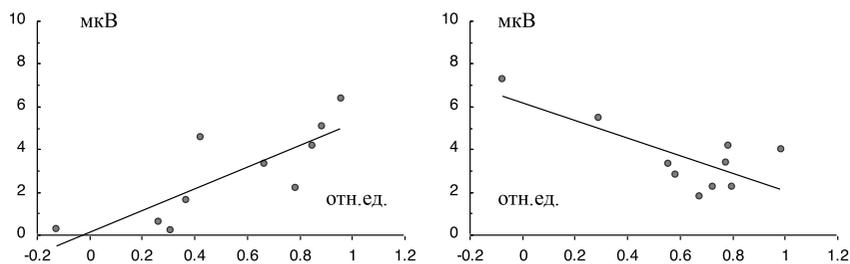


Рис. 2. Эффективность бимодальной интеграции (ось абсцисс) и амплитуда рассогласования ССП (ось ординат) в левой лобной коре при преимуществах зрительного входа (слева) и в правой теменной коре при преимуществах слухового входа (справа). Сплошной линией показаны функции линейной регрессии

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты указывают на то, что рассогласование между бимодальным ССП и кривой, полученной в результате суммирования унимодальных ответов на зрительные и слуховые стимулы, наблюдается практически во всех пунктах отведения. Уже этот факт может свидетельствовать о генерализованном характере процессов, обеспечивающих межсенсорную интеграцию. Кроме того, в предыдущем исследовании нами было установлено, что чем выше эффективность зрительно-слуховой интеграции, тем выше амплитуда обнаруженных рассогласований. Причем данная зависимость более выражена в передних отделах коры левого полушария [1]. Напомним, что эти данные были получены вне зависимости от того, какова относительная эффективность зрительного и слухового входов.

В данном исследовании мы рассмотрели эти вопросы с учетом того, какая из задействованных сенсорных систем является ведущей в решении предложенной задачи. Полученные результаты продемонстрировали, что в сравниваемых группах



обнаруженные закономерности носят противоположный характер. В группе испытуемых, в большей степени опирающихся на зрительную информацию, амплитуда рассогласования ССП коррелирует с эффективностью межсенсорной интеграции, причем такая связь достигает наивысших значений в лобной и височной коре левого полушария. Для испытуемых, отдающих предпочтение слуховой информации, связь амплитуды рассогласования с эффективностью интеграции носит отрицательный характер и больше выражена в теменной коре правого полушария.

Полученные результаты в обобщенном виде представлены на трехмерном графике, где данные обеих групп аппроксимированы методом наименьших квадратов (рис. 3). В качестве примера здесь взята левая лобная кора.

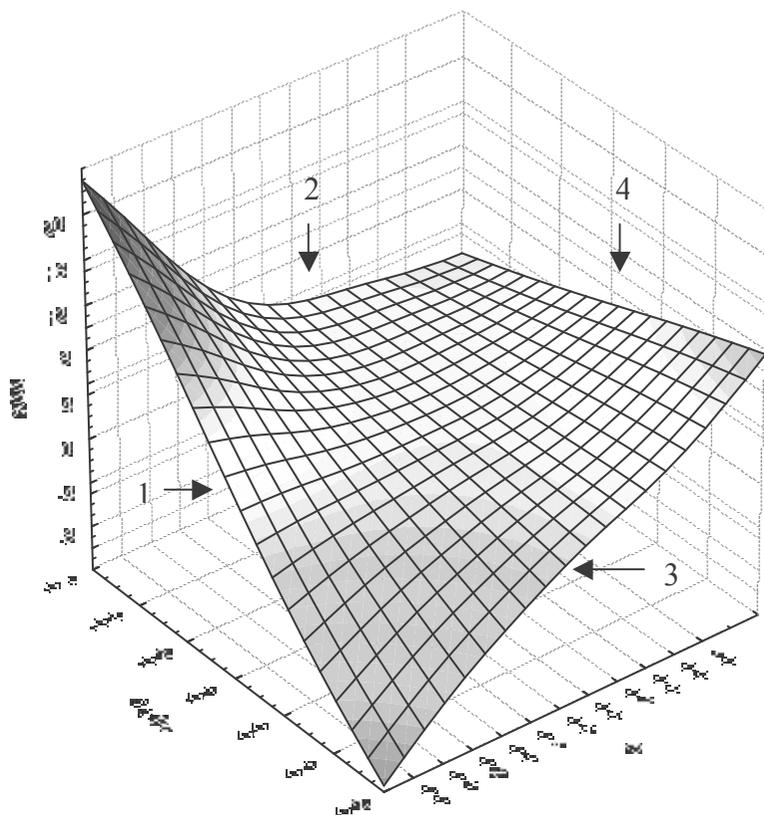


Рис. 3. Связь эффективности межсенсорной интеграции, соотношения эффективности сенсорных входов и амплитуды рассогласования в левой лобной коре. Обозначения осей: Э – эффективность интеграции (отн.ед.), Рзс – разница между вероятностью опознания зрительных и слуховых стимулов (отн.ед.), ЛЛК – амплитуда рассогласования в левой лобной коре (мкВ)

Видно, что при низкой эффективности зрительно-слуховой интеграции амплитуда рассогласования ССП существенно выше у тех испытуемых, которые опираются на слуховую информацию, по сравнению с теми, кто ориентируется на зрительный вход (на данном графике зависимость обозначена цифрой 1). Однако по мере увеличения эффективности интеграции у первых амплитуда рассогласования снижается (зависимость 2), а у вторых – возрастает (зависимость 3). В результате при высоких значениях эффективности амплитуда рассогласования становится уже выше у тех, кто отдает предпочтение зрительной информации (зависимость 4).

На что же указывают полученные результаты? Вывод, который может быть сделан, удобно проиллюстрировать графиком, показанном на рисунке 4.

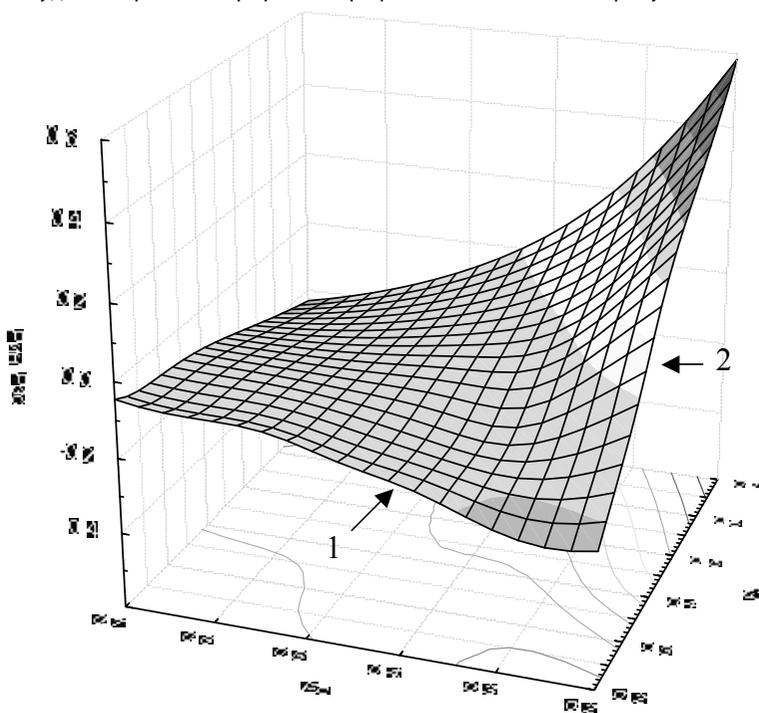


Рис. 4. Связь эффективности зрительно-слуховой интеграции с вероятностью опознания унимодальных стимулов. Обозначения осей: P_z – вероятность опознания зрительных стимулов (отн.ед.), P_c – вероятность опознания слуховых стимулов (отн.ед.), $P_{ин-Рзс}$ – степень приближения к эффективности интеграции «идеального наблюдателя»

На этом графике также объединены данные по всей выборке. Видно, что если зрительный вход используется слабо, то с увеличением эффективности слухового канала несколько растёт и эффективность межсенсорной интеграции (на данном



графике – зависимость 1). Если, напротив, слабо используется слуховой вход, то при увеличении вероятности зрительного опознания эффективность зрительно-слуховой интеграции возрастает значительно сильнее (зависимость 2). Таким образом, эффективность межсенсорной интеграции тем выше, чем ниже эффективность слухового и выше эффективность зрительного входа (диагональ между левым и правым углами поверхности). Напротив, относительно равное распределение ресурсов между модальностями наименее эффективно для межсенсорной интеграции (диагональ между ближним и дальним углами плоскости).

Как можно было бы интерпретировать такой вывод? То, что человеку свойственно использовать в первую очередь зрительную информацию, было показано еще в 1971 году Колавитой [5]. Сигналы других модальностей несут своего рода вспомогательное значение, но при этом в мозге реализованы механизмы интеграции, которые способствуют обогащению зрительных образов информацией других модальностей. Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что такая межсенсорная интеграция весьма эффективна. Однако когда для решения какой-либо задачи мы вынуждены опираться на незрительные сигналы (например, слуховые), их интеграция со зрительной информацией, как оказалось, становится значительно менее эффективной. Похоже, что передача информации по межсенсорным коммуникациям носит однонаправленный характер. Так, слуховая информация может дополнить зрительную, а вот обратный процесс неэффективен. Слуховая система вынуждена решать задачи опознания самостоятельно.

Если учесть, что эффективность интеграции коррелирует с амплитудой рассогласования ССП [1], то становится понятным, почему эта связь сначала уменьшается, а затем приобретает обратный знак при росте преимущества слухового входа над зрительным.

Но если результаты, полученные в двух сравниваемых группах, носят противоположный характер, как же тогда нам удалось обнаружить определенные закономерности, анализируя выборку в целом [1]? Ответ очевиден: это связано с тем, что зависимости, наблюдаемые у испытуемых с приоритетом зрительного входа, значительно более выражены, чем связи противоположного знака, характерные для тех, кто ориентируется на слуховой канал. В результате общие закономерности совпадают с теми, которые характерны для испытуемых с доминированием зрительной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что амплитуда рассогласования бимодального ССП и суммы унимодальных ответов коррелирует с эффективностью зрительно-слуховой интеграции. Эффективность интеграции, в свою очередь, зависит от относительной эффективности использования испытуемым зрительного и слухового входов. Интеграция тем более эффективна, чем выше относительная эффективность зрительного входа.



Данный результат может представлять также определенный интерес для решения вопросов, связанных с оптимизацией деятельности человека-оператора.

Литература

1. Бабенко В.В., Кульба С.Н., Котова М.Ю. Отражение эффективности гетеросенсорной интеграции в параметрах связанных с событием потенциалов // Журнал высш.нervн.деят-ти. – 2007. – Т. 57. – № 4. – С. 419-430.
2. Канеман Д. Внимание и усилие // Под ред. Гусева А.Н. – Москва: Смысл, 2006. – 288 с.
3. Benevento L.A., Fallon J., Davis B.J., Rezak M. Auditory-visual interaction in single cells in the cortex of the superior temporal sulcus and the orbital frontal cortex of the macaque monkey // *Exp. Neurol.* 1977. V. 57. P. 849-872.
4. Burch C., Wilson G., Orr C., Papanicolaou A.C. Crossmodal interactions of auditory stimulus presentation on the visual evoked magnetic response. *Advances in biomagnetism* / Ed. Williamson S.J. – N.Y.: Plenum Press, 1989. – P. 221-224.
5. Colavita F.B. Interspecies differences in sensory dominance // Twelfth Annual Meeting of the Psychonomic Society, St. Louis. 1971.
6. Downar J., Clawley A., Mikulis D. A multimodal cortical network for the deflection of changes in the sensory environment // *Nat. Neurosci.* 2000. – V. 3. – P. 277-283.
7. Giard M.H., Peronnet F. Auditory-visual integration during multimodal object recognition in human: a behavioral and electrophysiological study // *J. Cogn. Neurosci.* 1999. – V. 11. – P. 473-490.
8. Ito S.I. Prefrontal unit activity of macaque monkeys during auditory and visual reaction time tasks // *Brain Res.* 1982. – V. 247. – P. 39-47.
9. Sams M., Imada T. Integration of auditory and visual information in the human brain: Neuromagnetic evidence // *Soc. Neurosci. Abstracts.* 1997. – V. 23. – P. 1305.
10. Vaadia E., Benson D.A., Heinz R.D., Golstein M.H. Unit study of monkey frontal cortex: Active localization of auditory and of visual stimuli // *J. Neurophysiol.* 1986. – V. 56. – P. 934-952.