

3-мерное восприятие в отсутствие слияния бинауральной информации: Что нового мы узнали о развитии слуховой системы благодаря кохлеарным имплантам?

Блейк Папсин (Blake C. Papsin)

SickKids

THE HOSPITAL FOR
SICK CHILDREN

COCHLEAR
IMPLANT
PROGRAM

5th Latin America Pediatric
Conference

Sound for a Young Generation



PHONAK
life is on



Отдел кохлеарной имплантации (2018 г.)



- Blake Papsin
- Vicky Papaioannou
- Karen Gordon
- Sharon Cushing

- Gina Goulding
- Naureen Sohail
- Laurie MacDonald
- Patt Fuller
- Adrian James

- Mary Lynn Feness
- Pat Di Santos
- Nancy Greenwald-Hood
- Susan Druker

- Valerie Simard
- Rebecca Malcomson
- Joeline Huber
- Gillian Lieberman
- Stephanie Jewell

Отдел исследования кохлеарных имплантов

РУКОВОДИТЕЛИ

- Karen Gordon
- Blake Papsin
- Sharon Cushing

КООРДИНАТОРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Carmen McKnight
- Christina Lavallee

АСПИРАНТЫ

- Salima Jiwani
- Melissa Polonenko
- Nikolaus Wolter
- Morrison Steel
- Michael Deighton
- Sara Giannantonio
- Josh Gnanasegaram



СОАВТОРЫ

Внутренние – Sick Kids

- Bob Harrison
- Susan Blaser
- Adrian James
- Sam Doesburg
- Vicky Papaioannou

Внешние

- Sandra Trehub
- Frank Russo

Зарубежные

- Robert Cowen
- Richard van Hoesel

ПОСТДОКТОРАНТЫ

- Vijayalakshmi Easwar
- William Parkes
- Shazia Peer

ФИНАНСИРОВАНИЕ

- CIHR
- SickKids Foundation



CIHR IRSC



Введение

- Живые существа борются за выживание
- Эволюция/пластичность
 - генетическая
 - факультативная



Этот кальмар практически не изменился за миллионы лет, потому что его анатомия и физиология идеально приспособлены для его существования. У него отсутствует необходимость в факультативной эволюции

Факультативная эволюция

Стая скворцов, движущаяся как единое целое, чтобы не стать жертвами хищных птиц – способность, выработанная в ходе факультативной (негенетической) эволюции



Кадр из видео "Скворцы в Отмуре" (автор: Dylan Winter)

Слияние (объединение) слуховой информации

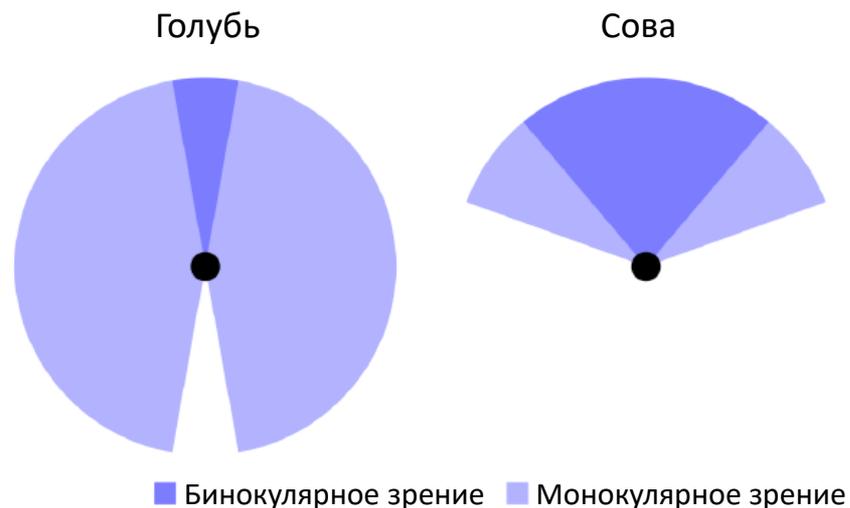
- Извлечение признаков
 - бинауральность
 - слияние (объединение) слуховых образов
- (Ре)конструирование слуховой среды
 - усилия



Информация, полученная каждым ухом в отдельности, объединяется и из нее математически извлекается общая информация. Так реконструируется 3-мерный образ реальности. Визуальная аналогия: нашему мозгу требуется некоторое время и энергия (т.е. усилие) для того, чтобы понять, что рука не больше автомобиля, человека и дерева, человек не больше машины и дерева, а всё дело в расстоянии.

Слияние образов

- Функциональная необходимость



Добыча

Охотник

Способность слияния информации неодинакова у разных существ. Голубь должен смотреть на 360 градусов, чтобы его не съели, но ему почти не нужно бинокулярное зрение. Корм находится прямо перед ним. Сова, наоборот, не нуждается в зрении на 360 градусов (при необходимости она может повернуть голову), но ей нужно бинокулярное зрение, чтобы оценить расстояние до добычи.

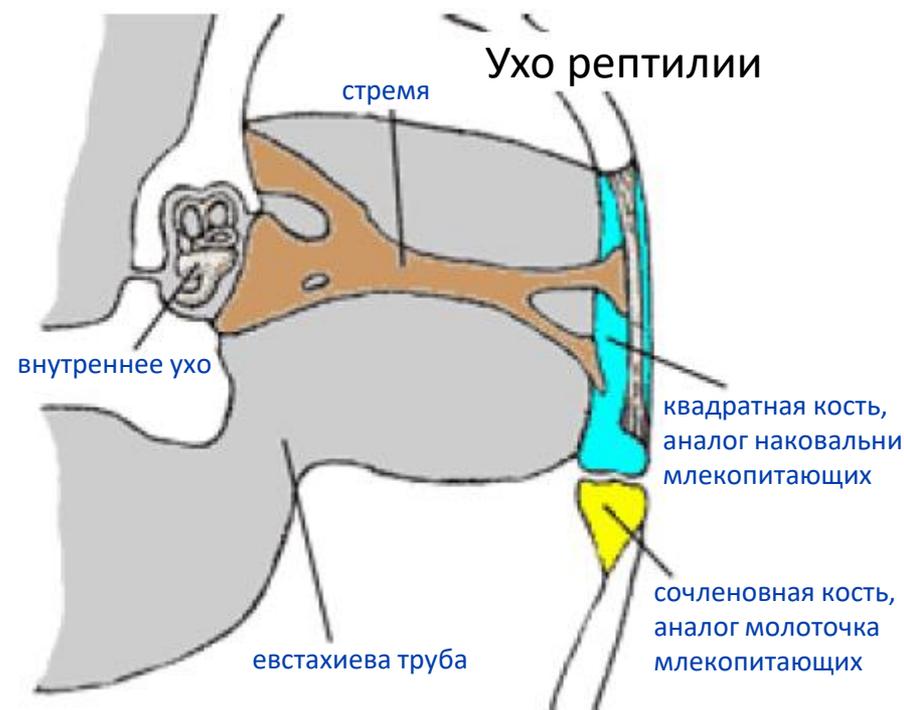
Отсутствие слияния слуховых образов

- *Mantis religiosa*
(богомол)
- **1 ухо** (расположено на груди, воспринимает только низкочастотную информацию, чтобы уловить взмахи крыльев приближающегося хищника)
- **2 основных глаза**
(объединяют информацию для оценки расстояния до добычи)
 - **3 простых глаза, расположенные между основными**
(фиксируемая ими информация не объединяется, т.к. используется только для рассматривания схваченной добычи)



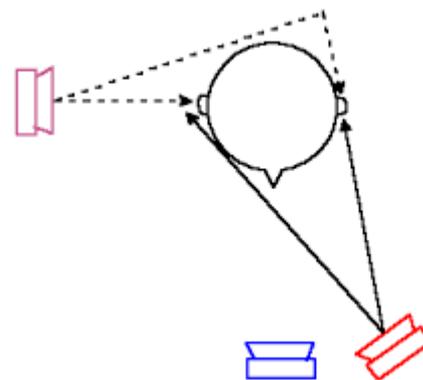
Уши змеи

- Наружное ухо и барабанная перепонка отсутствуют
- Костное звукопроведение (молоточек и наковальня прикреплены к челюсти, поэтому в оба уха поступает одинаковая информация, объединение которой не имеет смысла; недостаток информации дополняется обонянием и осязанием)
- Возможна рудиментарная бинауральность



Бинауральное восприятие

- Локализация /
позиционирование
источника звука
 - информация о времени
поступления сигнала
 - информация о
громкости сигнала
- Реконструирование
информации требует
усилий
 - опыт
 - восприятие паттернов



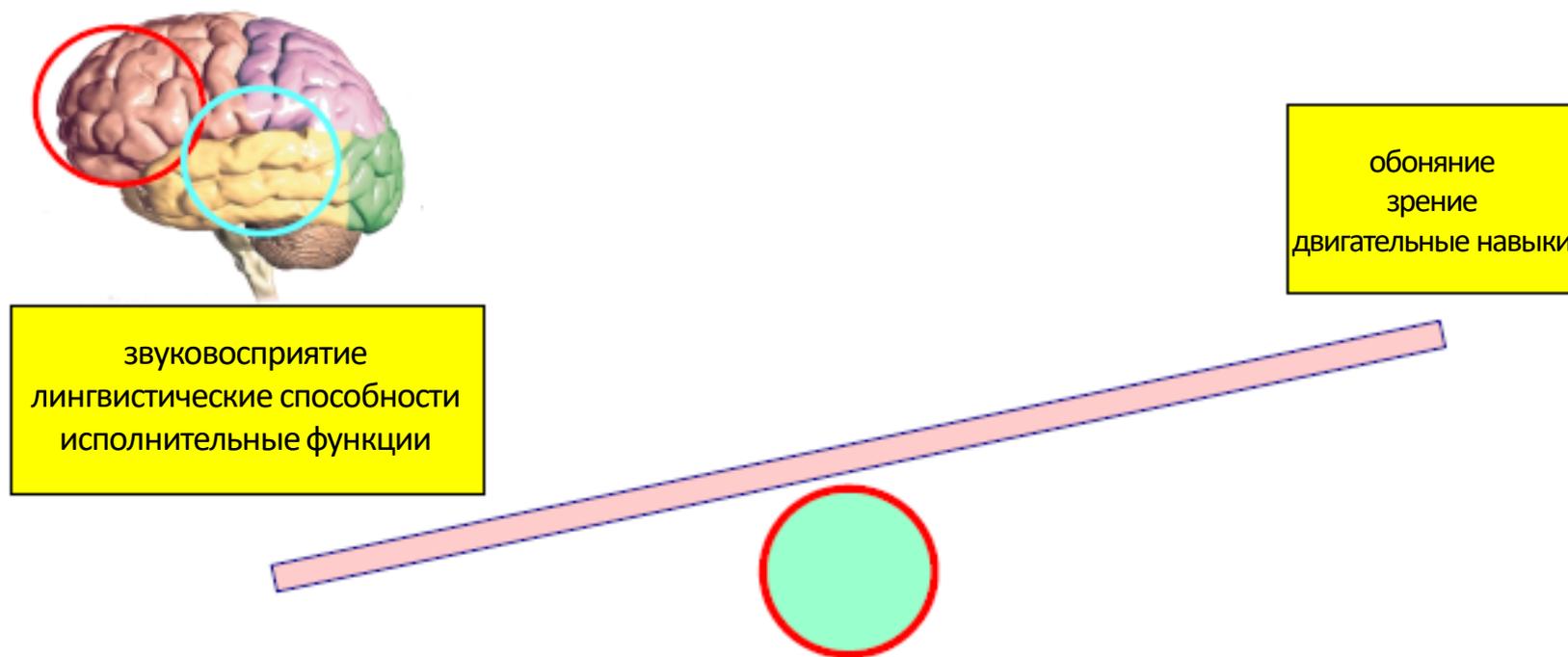
Бинауральное восприятие

- Локализация /
позиционирование
источника звука
 - информация о времени
поступления сигнала
 - информация о
громкости сигнала
- Реконструирование
информации требует
усилий
 - опыт
 - восприятие паттернов



Благодаря этому мы способны ориентироваться в сложном трехмерном пространстве

Люди – пожиратели речи



Мы – пожиратели речи. Благодаря речи человек создал понятия настоящего, прошлого и будущего, получил возможность планирования. Это произошло путем факультативной эволюции. С другой стороны, форели не нужны такие сложные понятия и, следовательно, факультативная эволюция. Её IQ не превышает 8, но нам очень сложно или даже невозможно поймать ее голыми руками, потому что её эволюция заключалась как раз в том, чтобы не быть пойманной.

Опыт двусторонней кохлеарной имплантации (КИ) фонда SickKids

Одновременная имплантация

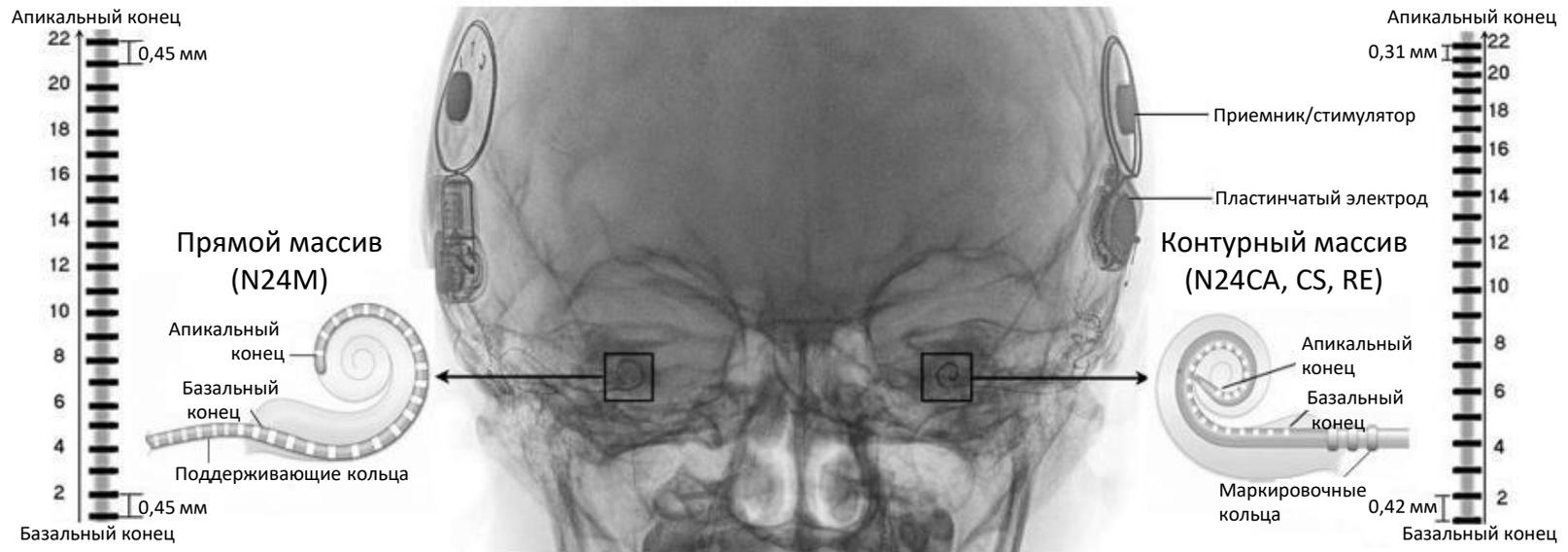
- n = 257
- Возраст на момент КИ = $3,1 \pm 3,6$ года

Последовательная имплантация

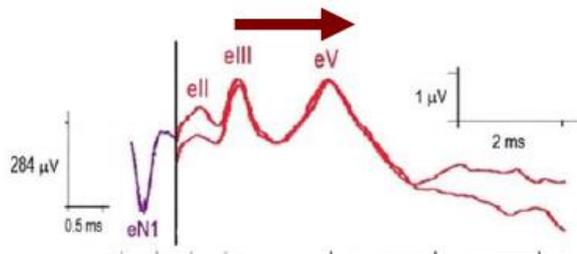
- n = 195
- Возраст на момент 1-й КИ = $3,5 \pm 3,2$ года
- Возраст на момент 2-й КИ = $9,8 \pm 4,8$ года
- Интервал между КИ = $6,3 \pm 4,1$ года

4214 • J. Neurosci., March 21, 2012 • 32(12):4212–4223

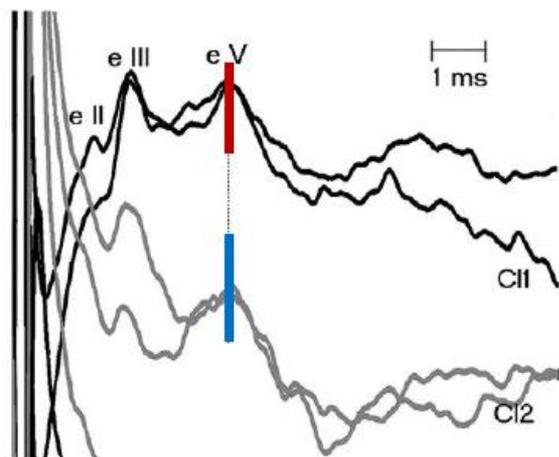
Gordon et al. • Binaural Interaction in Brainstem of Deaf Children



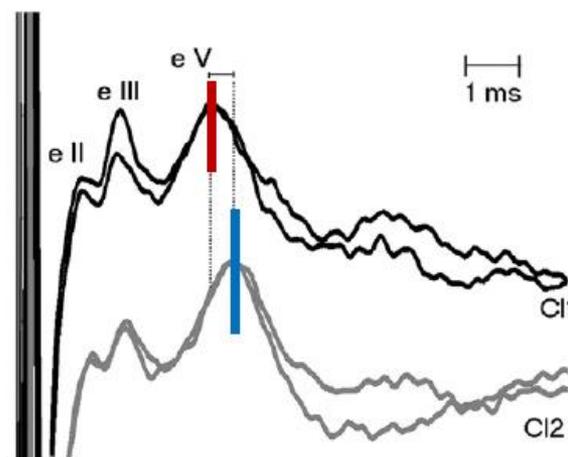
Асимметрия мозга (билатеральная)



Одновременная имплантация



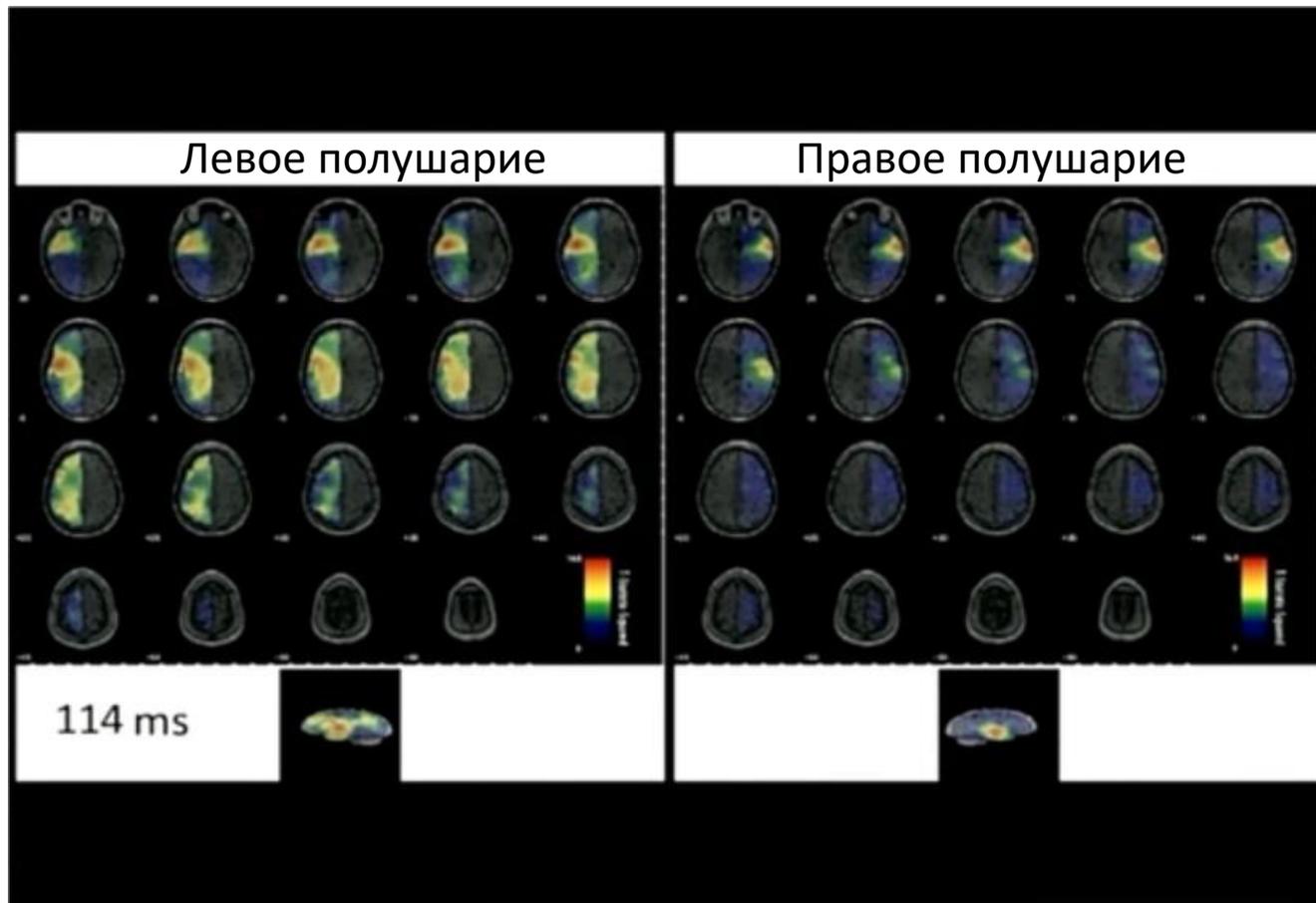
Последовательная имплантация (>2 лет)



При одновременной КИ происходит полноценное слияние информации – латентные периоды (ЛП) волны V одинаковые с обеих сторон. При последовательной КИ слияния не происходит - ЛП на стороне более поздней КИ заметно длиннее.

(J Neuroscience 2012)

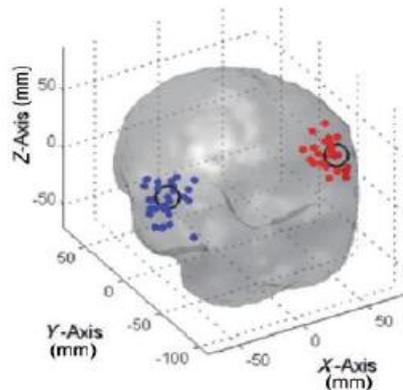
Изучение бинаурального восприятия



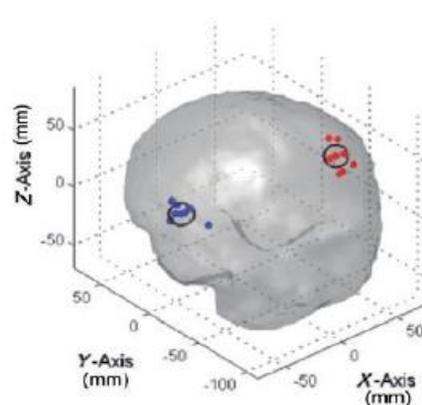
Активность полушарий головного мозга, зарегистрированная с помощью многоэлектродной ЭЭГ (без МРТ). Позволяет неинвазивно изучать обработку информации мозгом у людей с кохлеарными имплантами.

Изучение бинаурального восприятия

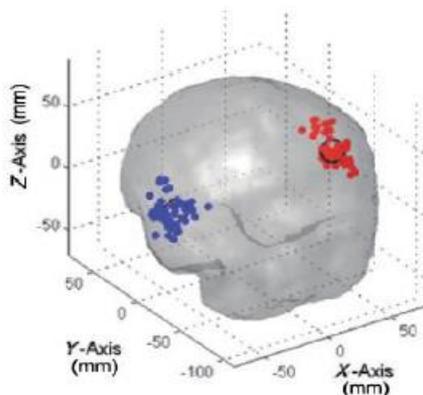
Нормальный слух (n = 7)



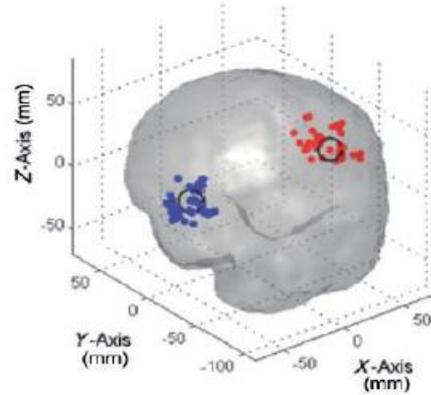
Односторонняя КИ (n = 8)



Последовательная 2-сторонняя КИ (n = 16)



Одновременная 2-сторонняя КИ (n = 10)

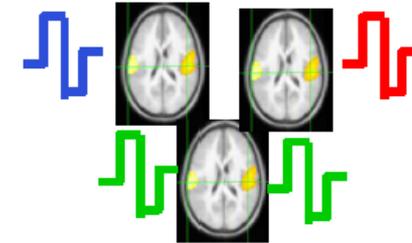
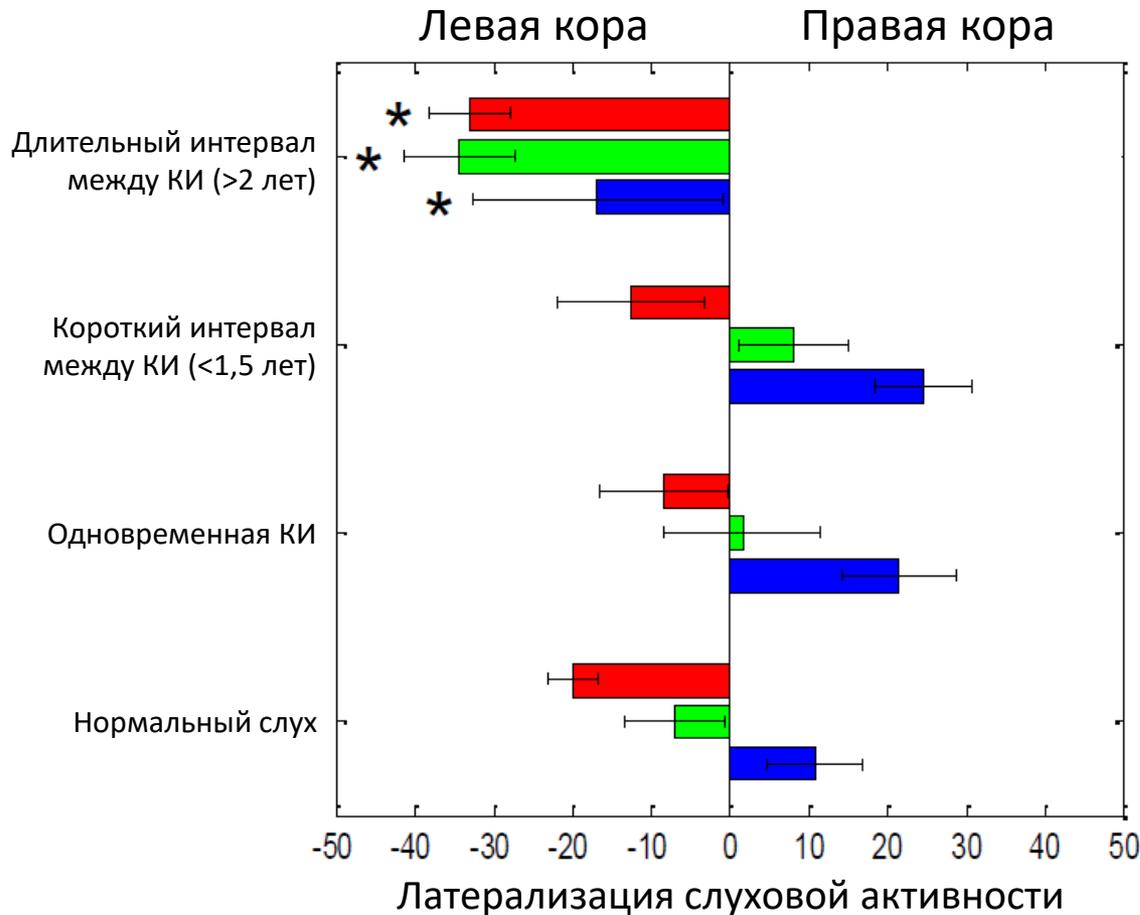


■ Левая слуховая кора

■ Правая слуховая кора

Визуализация активности слуховой коры, выполненная с помощью упомянутой на предыдущем слайде методики

Корковая латерализация при последовательной и одновременной КИ

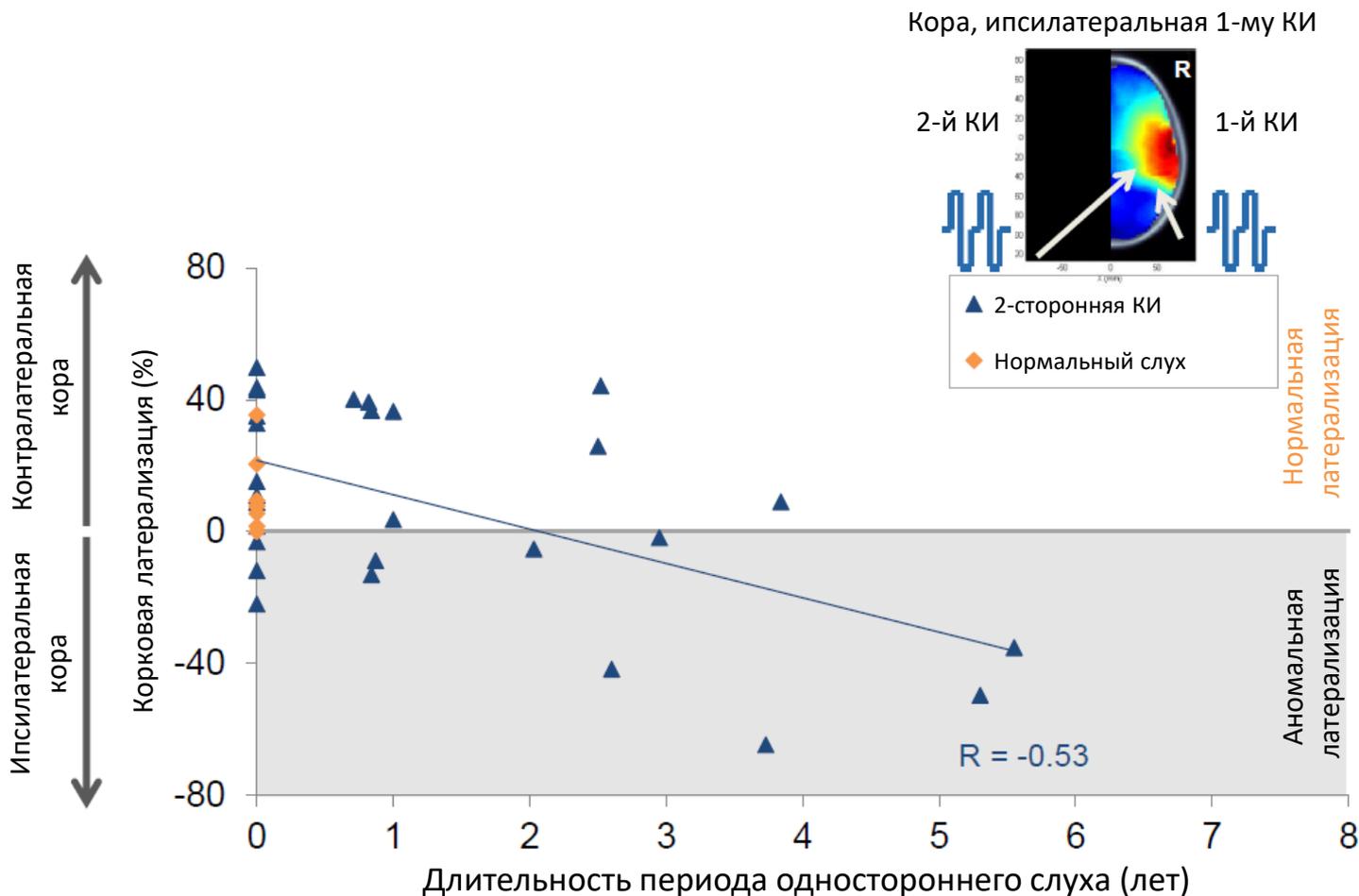


* P < 0.05

(Brain 2013)

Информация из левого уха должна передаваться в правую слуховую кору, и наоборот. Так происходит в норме, при одновременной КИ и при небольшом интервале между 1-й и 2-й КИ. Однако при последовательной КИ, выполненной с большим интервалом, сигналы из обеих ушей поступают в одну и ту же кору (в данном примере – в левую). Предположительно, противоположная кора выполняет в это время какую-то иную задачу. За 15 лет наблюдений нормальное распределение сигналов так и не восстановилось.

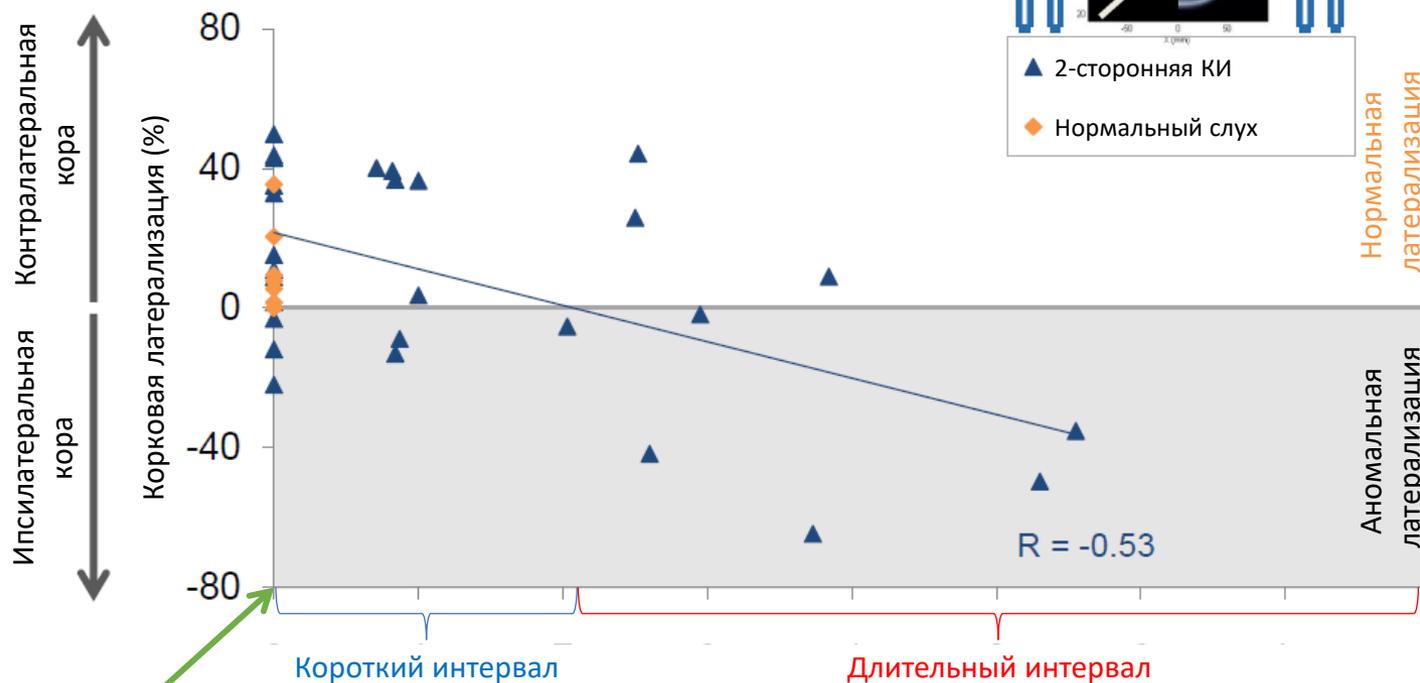
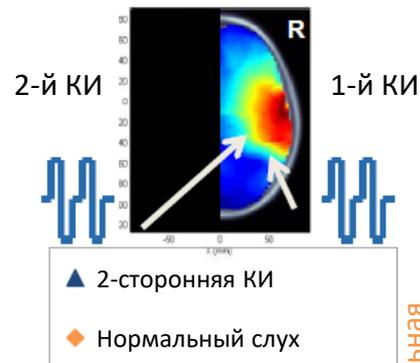
Аномальная корковая латерализация



(Brain 2013)

Аномальная корковая латерализация

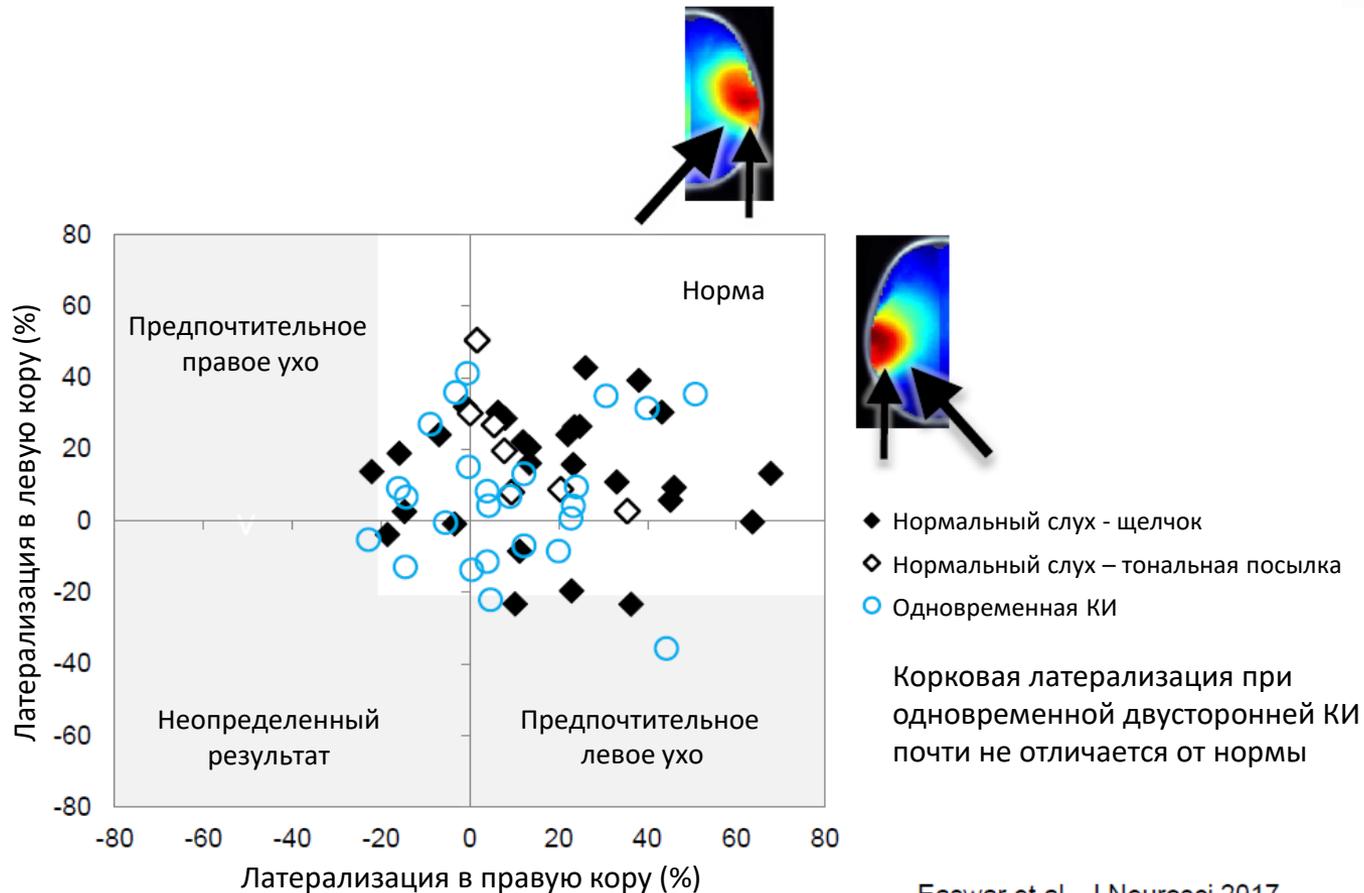
Кора, ипсилатеральная 1-му КИ



Чем продолжительнее интервал между 1-й и 2-й КИ, тем чаще встречается аномальная латерализация (в ипсилатеральную кору)

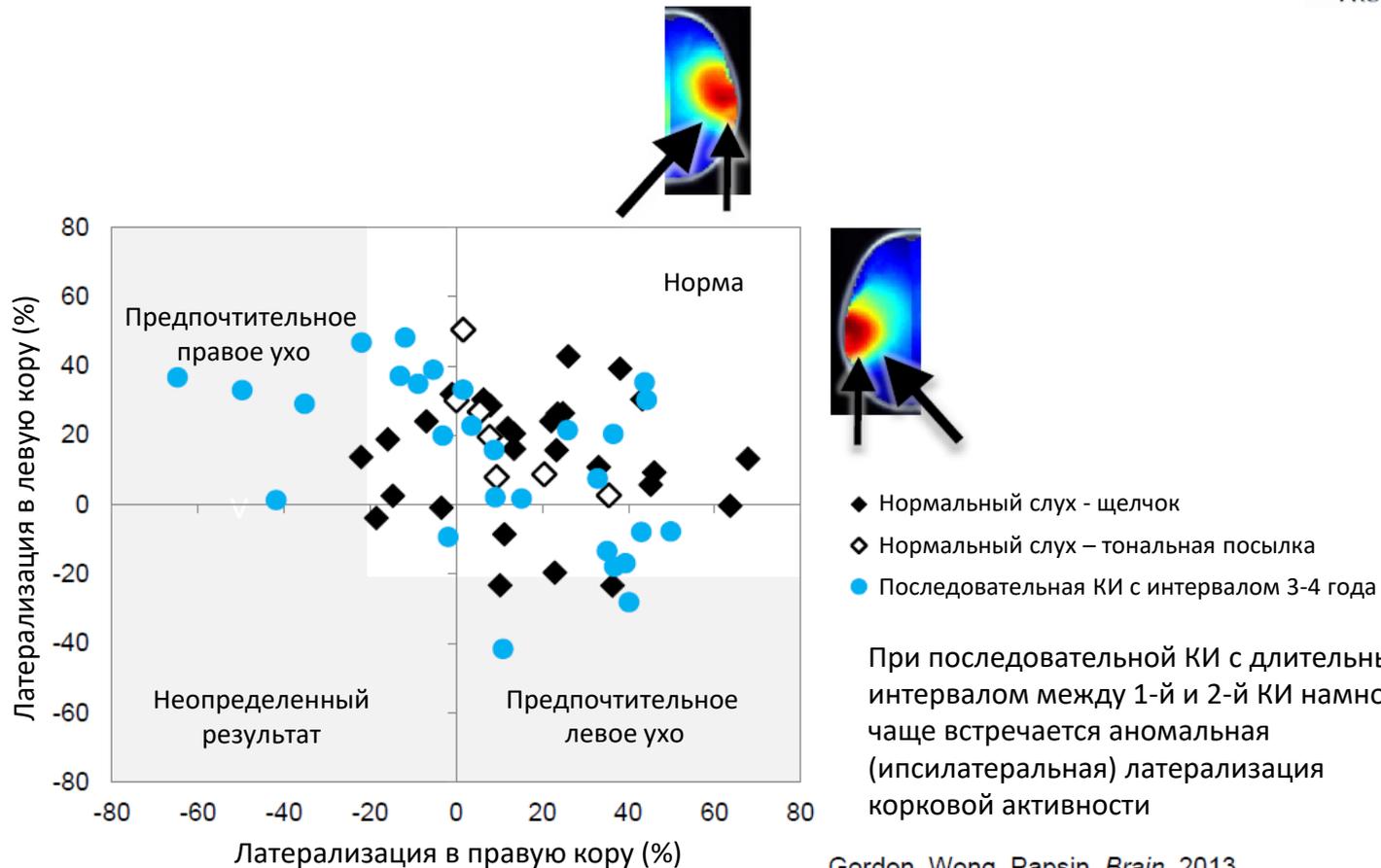
(Brain 2013)

График корковой латерализации



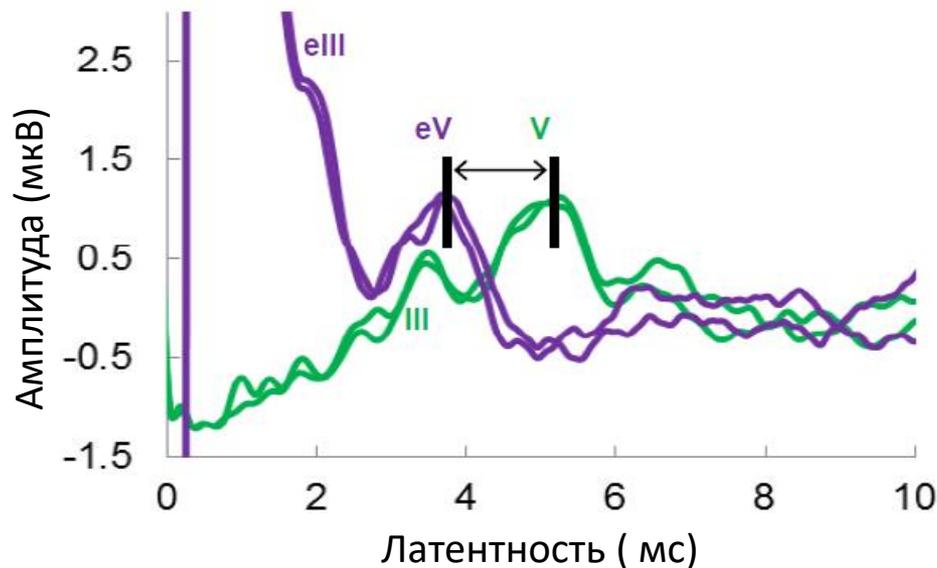
Easwar et al., J Neurosci 2017

График корковой латерализации



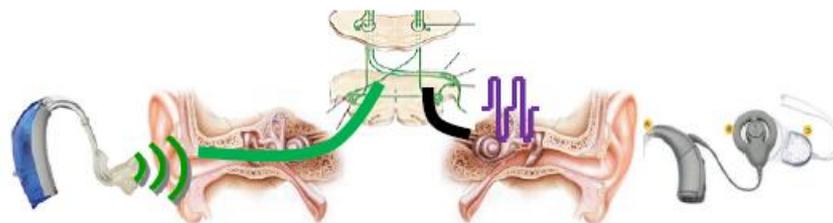
Gordon, Wong, Papsin, *Brain*, 2013

Бимодальная коррекция: асимметрия на уровне ствола мозга



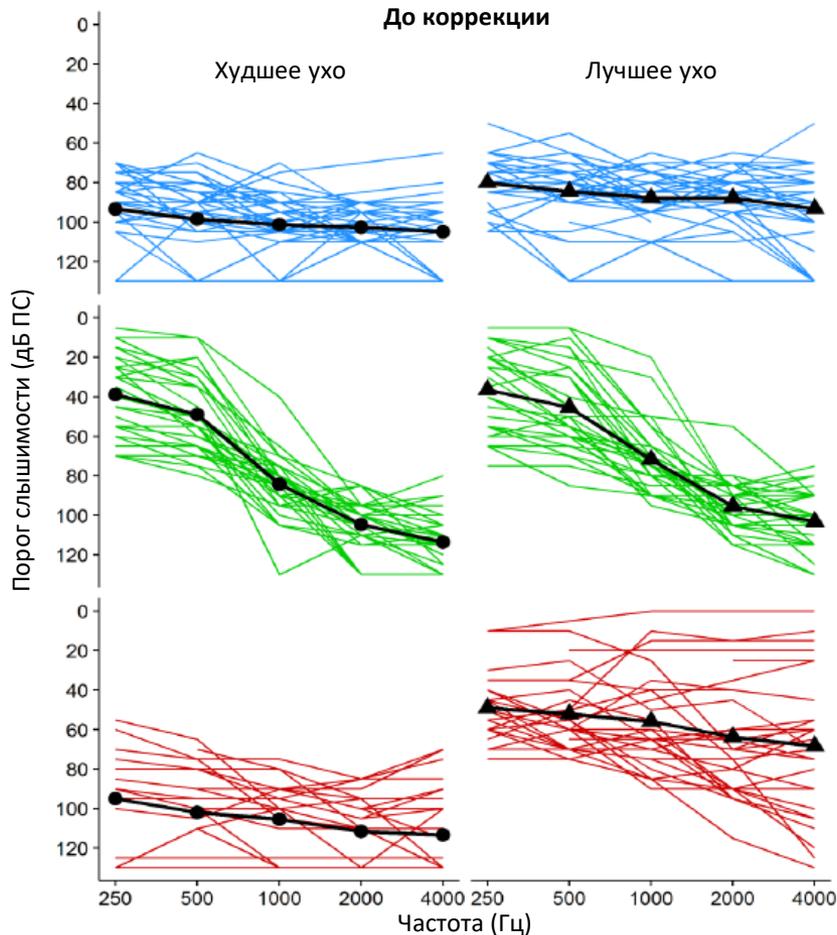
— акустический КСВП
— электрический КСВП

Латентности электрического и акустического ответов никогда не совпадают из-за различной модальности стимулов. В лучшем случае междушное различие латентных периодов будет таким же, как при последовательной двусторонней КИ.



(*Audiol Neurotol* 2015)

Аудиограммы пациентов с бимодальной коррекцией слуха, участвовавших в исследовании



Традиционные
n = 44 (40%)

Нетрадиционные симметричные
n = 32 (30%)

Нетрадиционные асимметричные
n = 33 (30%)

Аудиограммы пациентов с бимодальной коррекцией слуха, участвовавших в исследовании

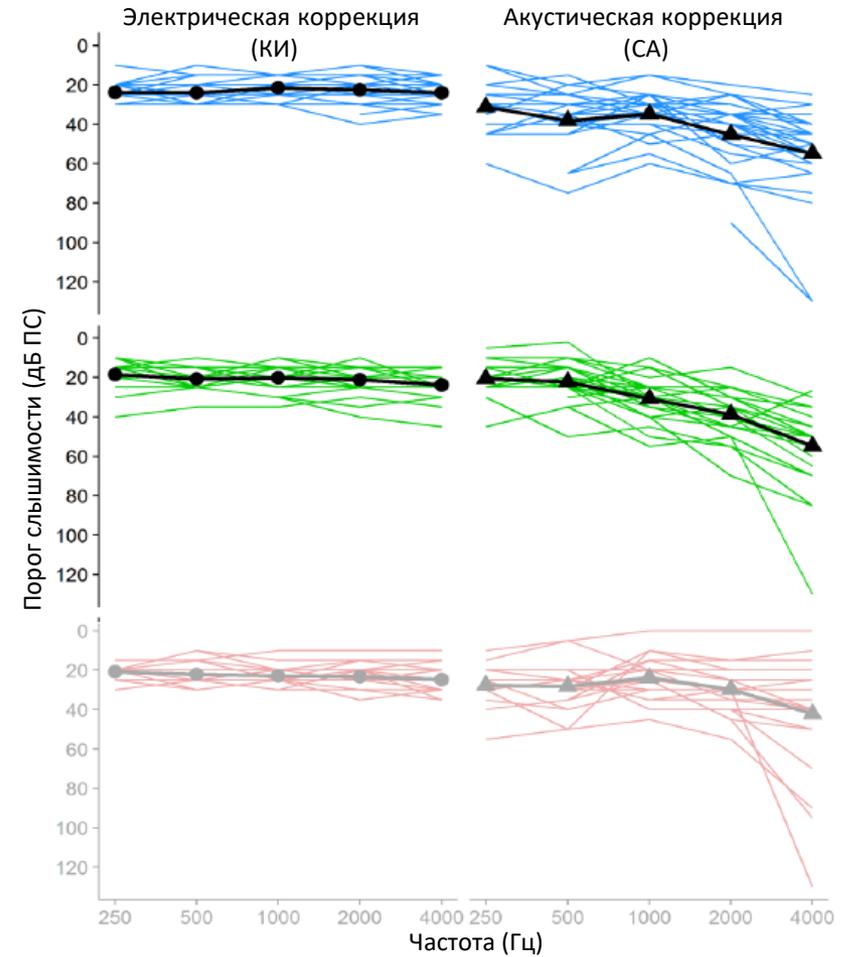
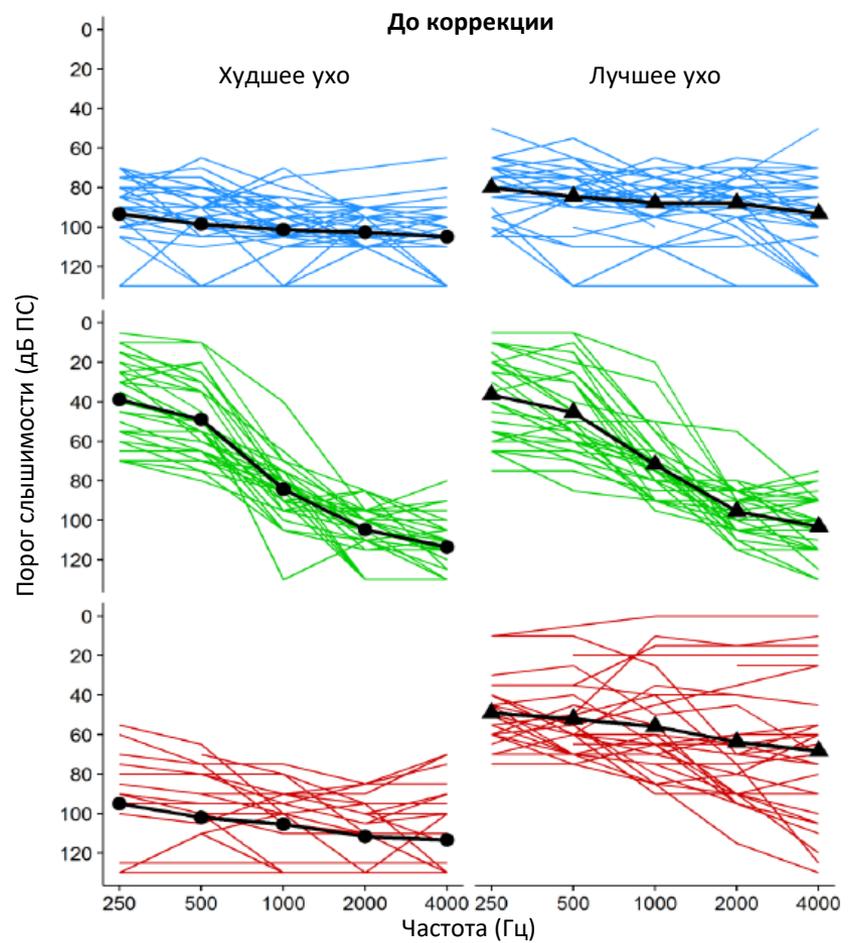
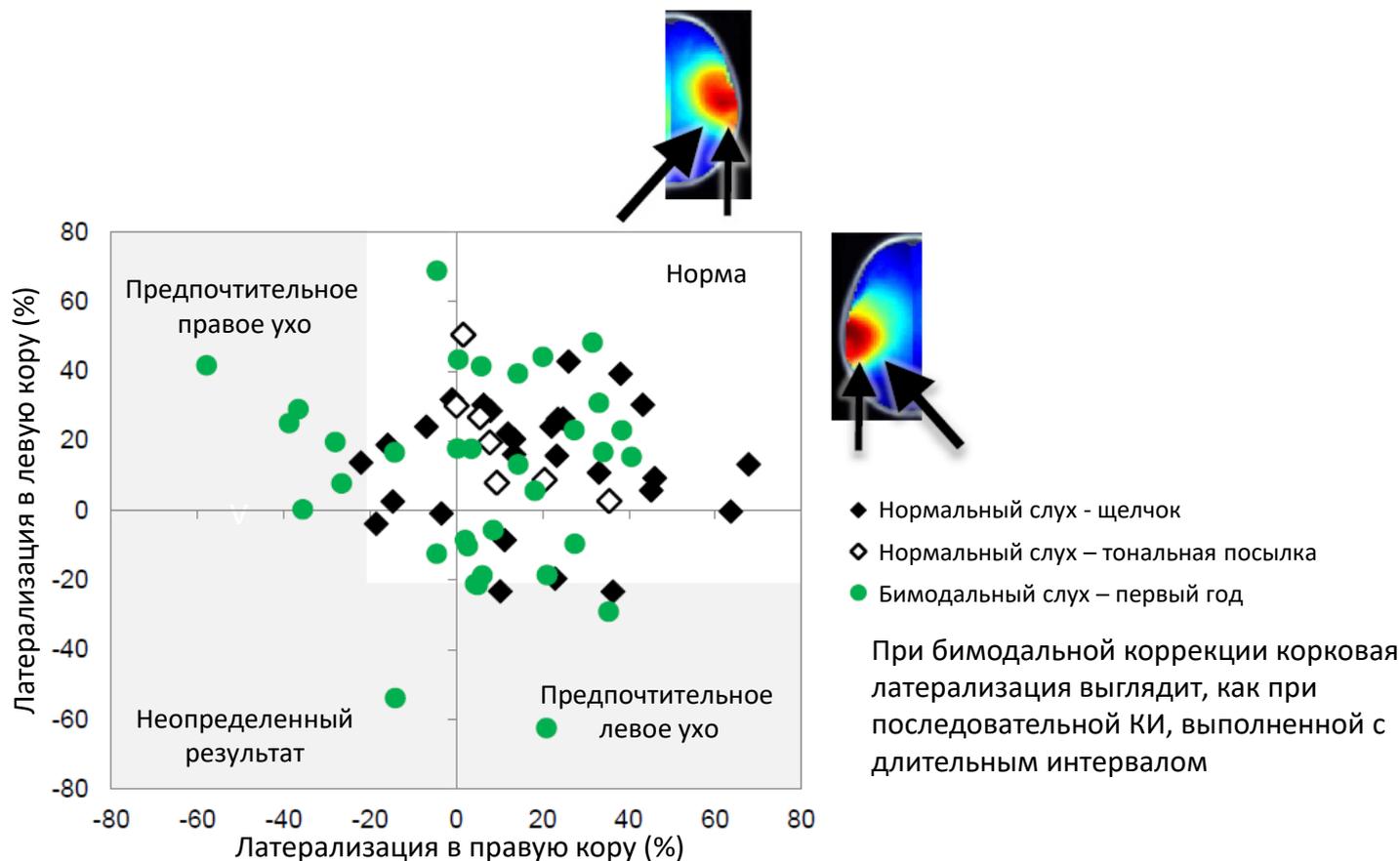
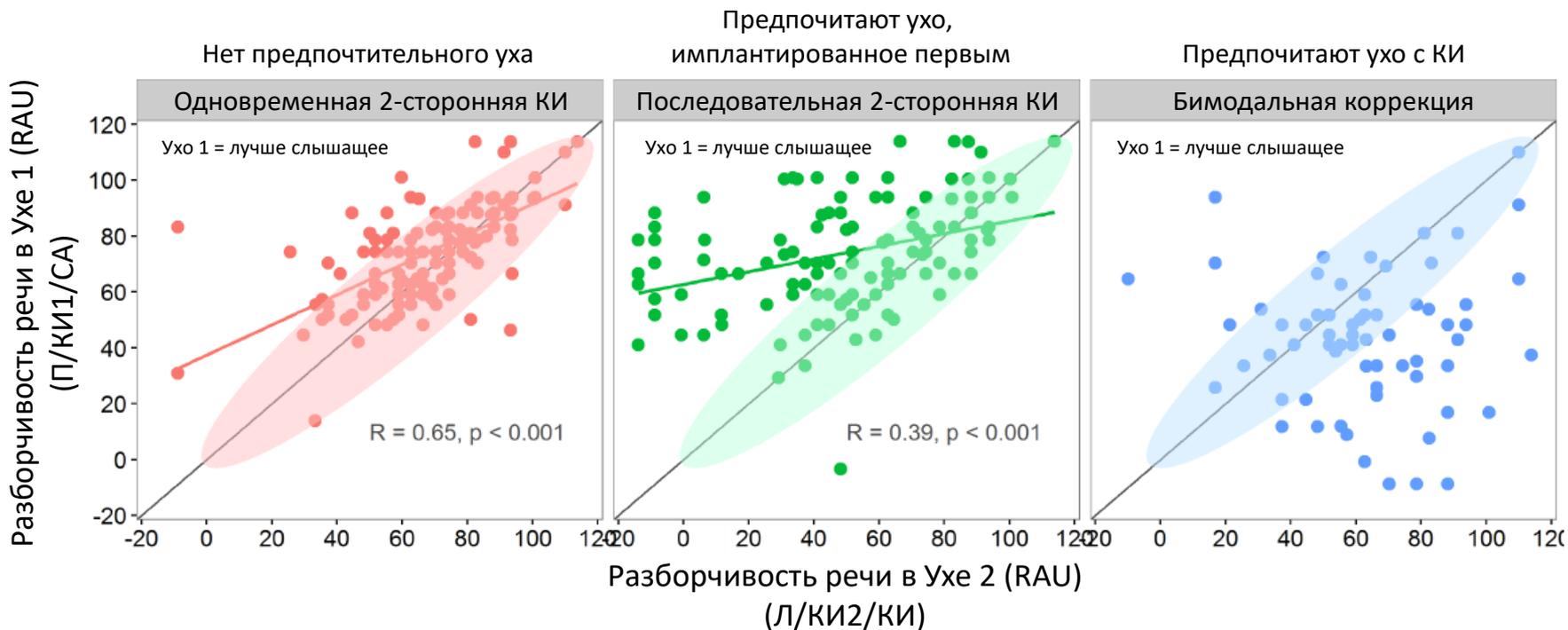


График корковой латерализации

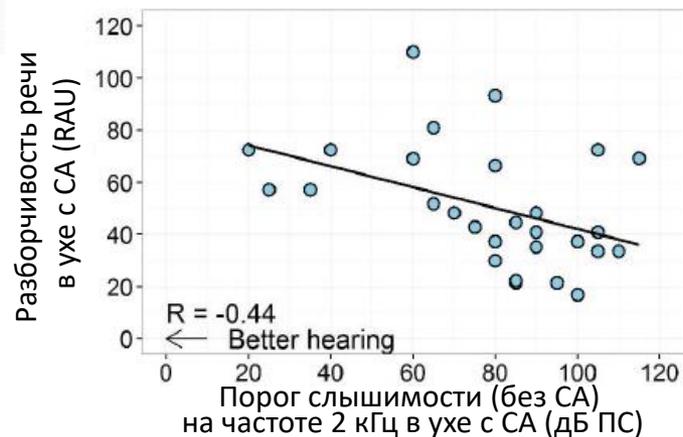
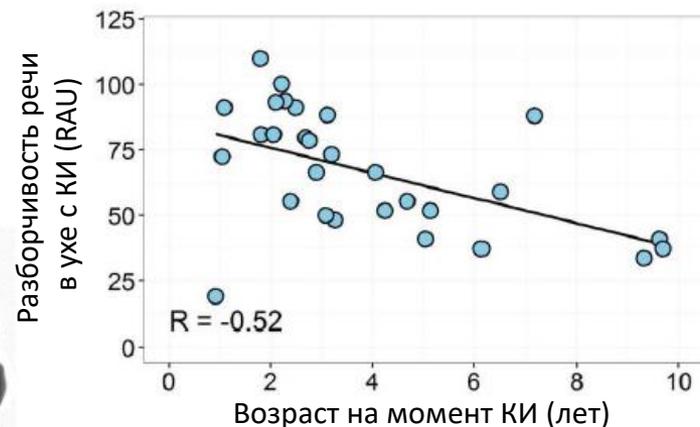
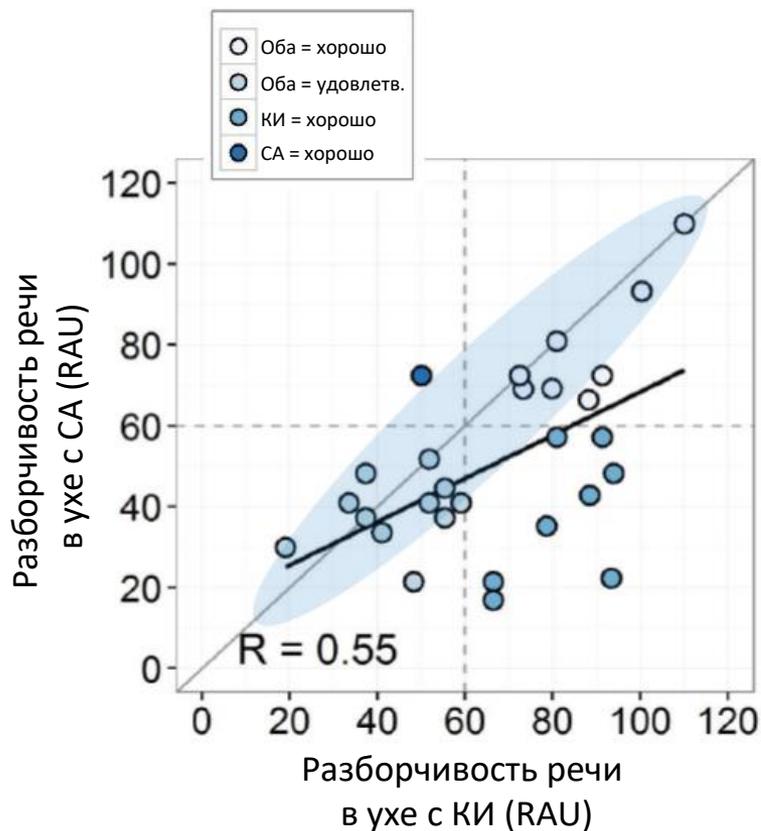


Gordon, Wong, Papsin, *Brain*, 2013

Разборчивость речи при бинауральной коррекции



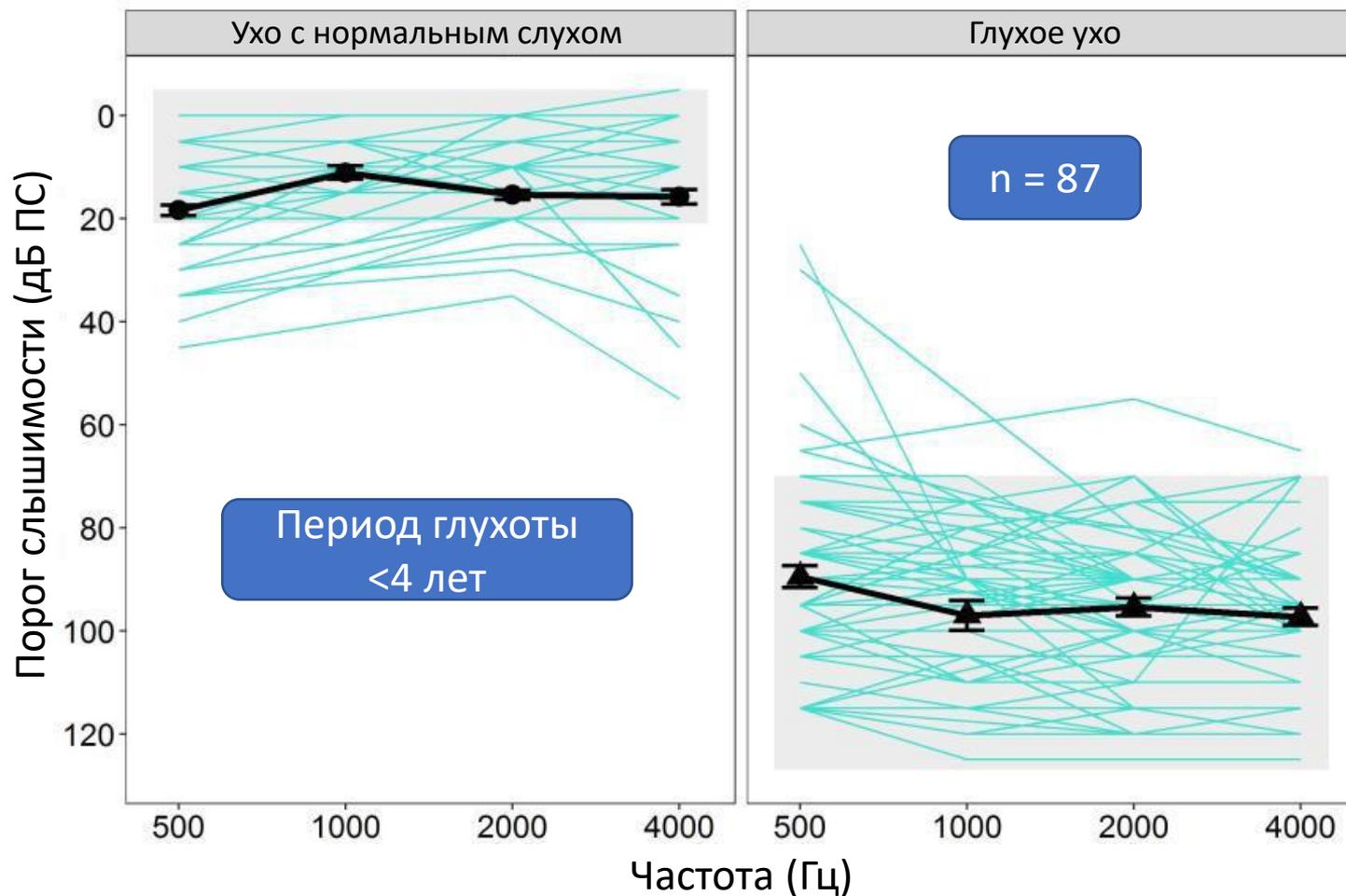
Слух у детей с бимодальной коррекцией



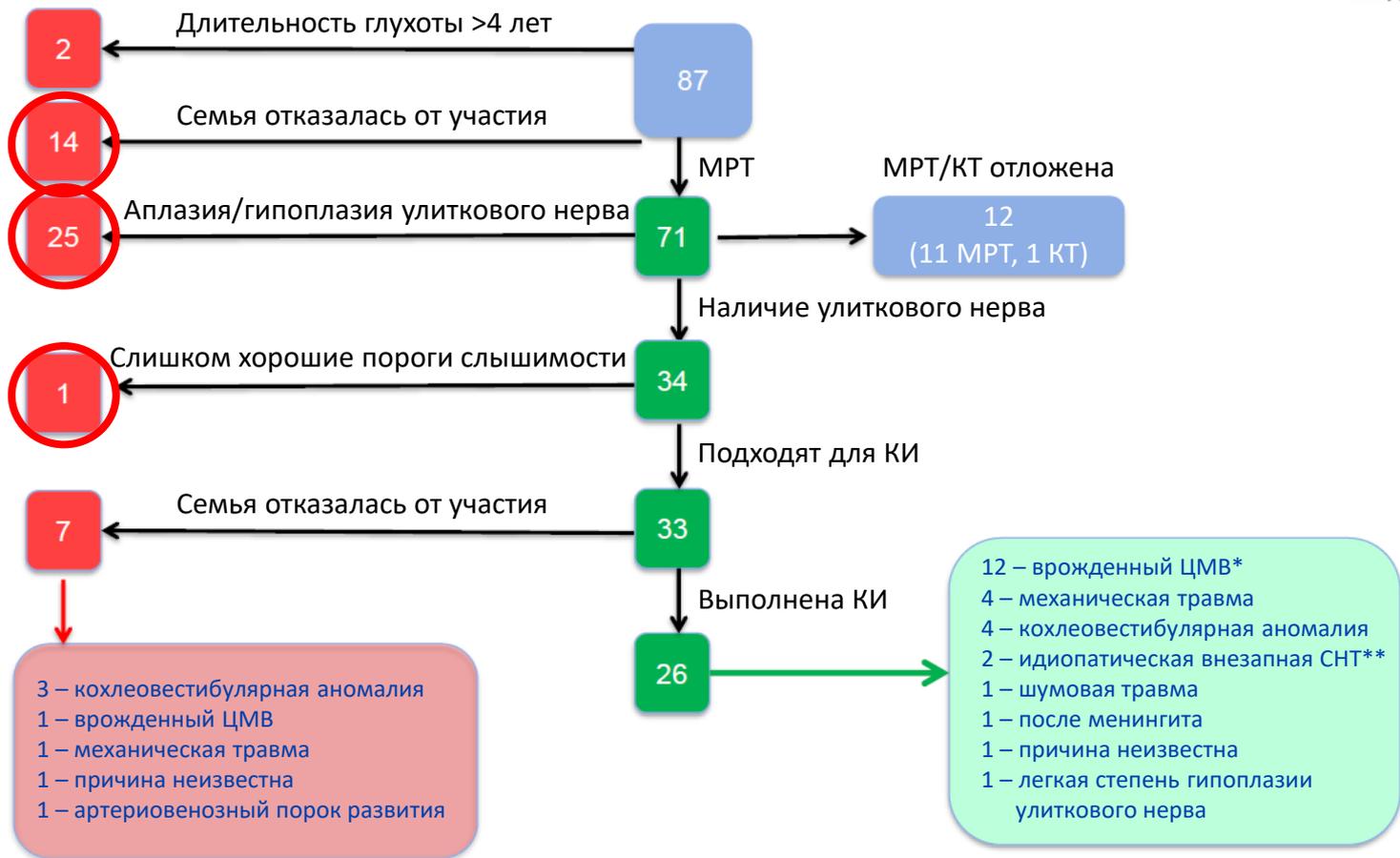
Выводы

- При асимметричном слухе нейронные слуховые пути развиваются аномально
 - асимметричный вход до имплантации
 - несбалансированный вход после имплантации (при двустороннем использовании устройств)
- Наши действия
 - изменение критериев имплантации
 - двусторонний баланс в дополнение к односторонней настройке в соответствии с целевыми значениями

Односторонняя глухота у детей



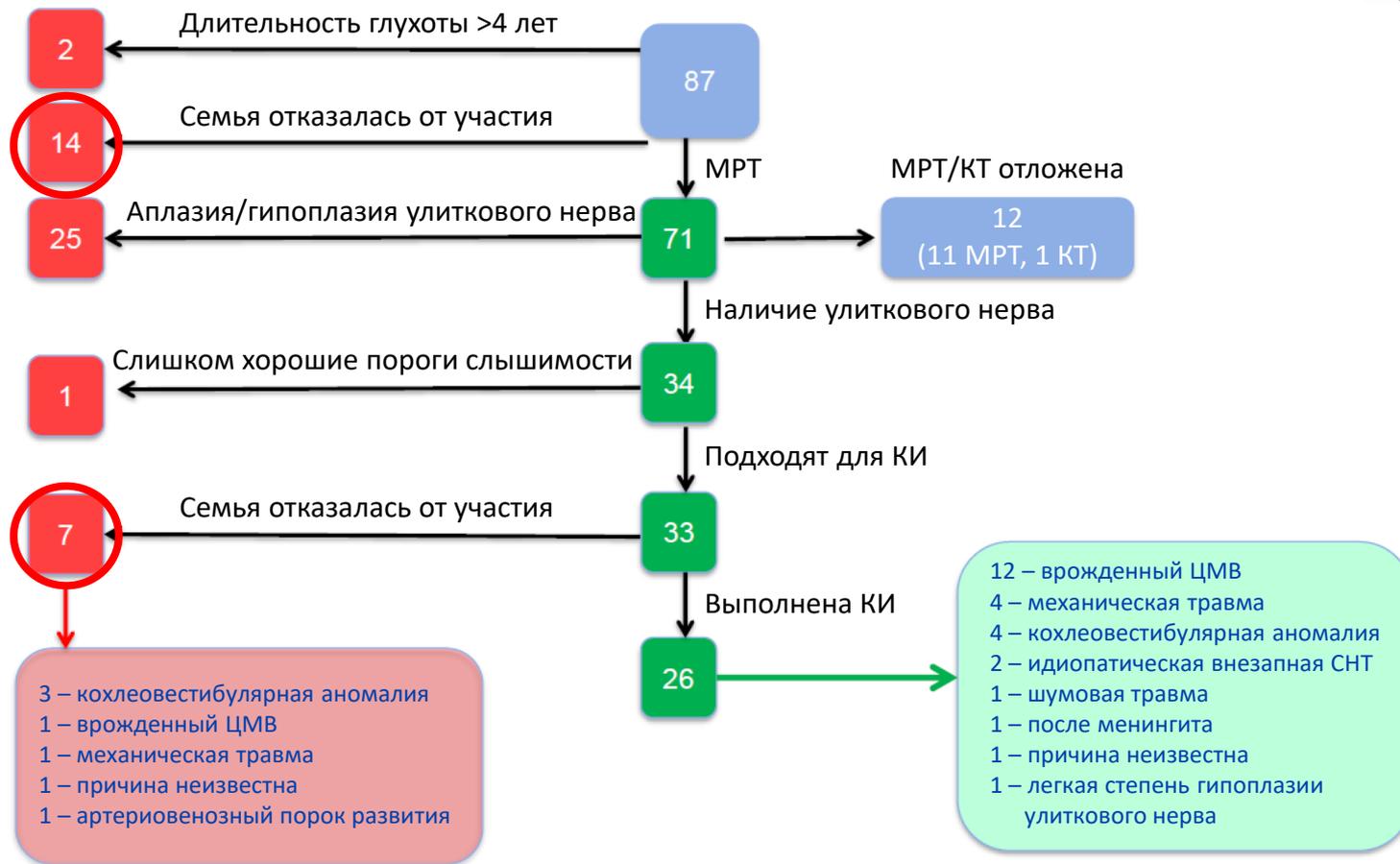
Отсев из первоначальной группы (87 человек)



68% детей могли бы быть кандидатами на выполнение КИ

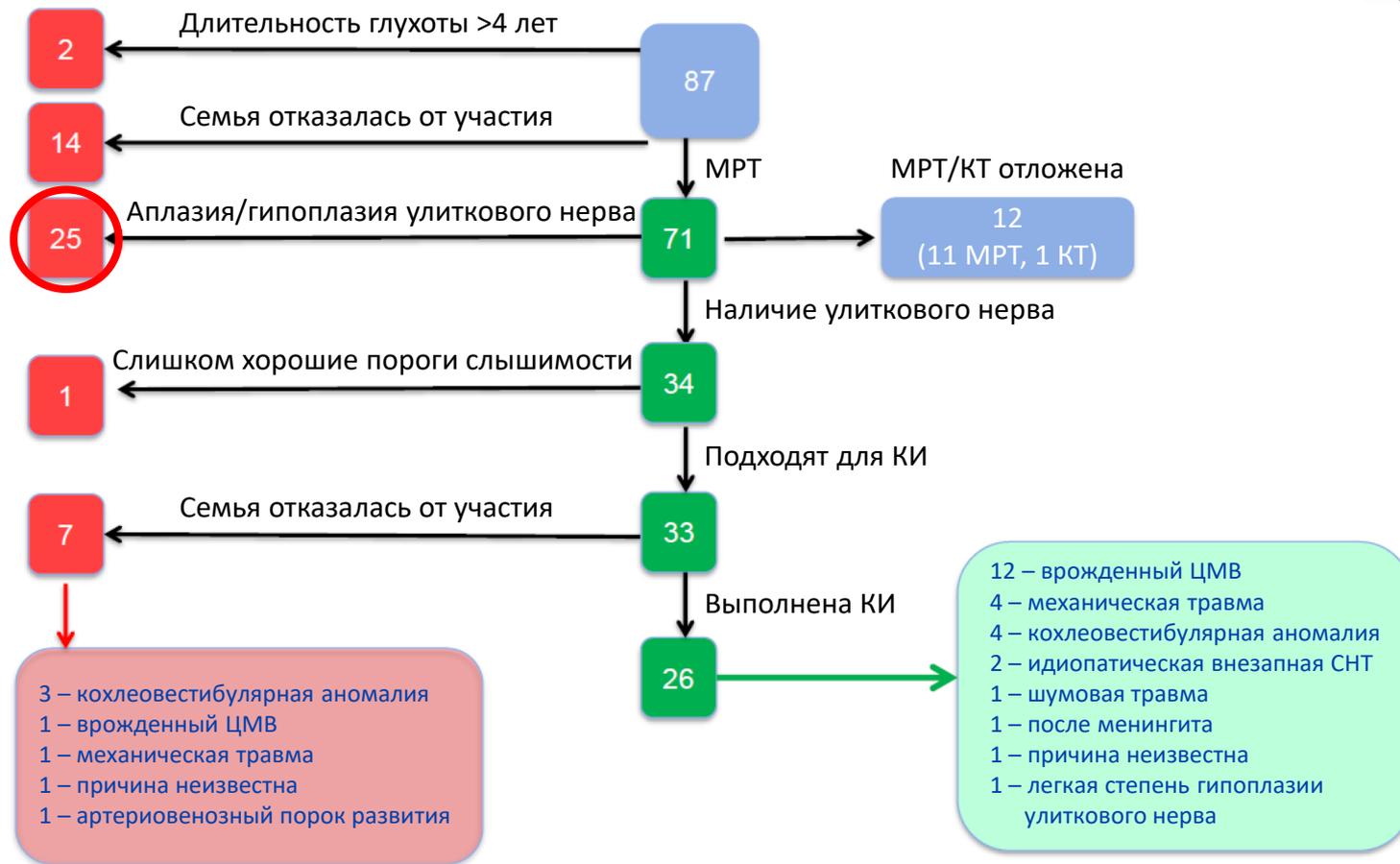
*цитомегаловирус
**сенсоневральная тугоухость

Но...



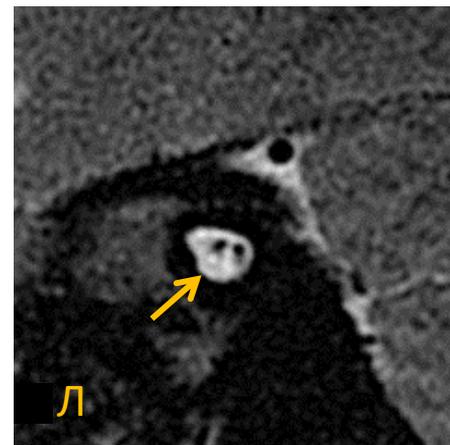
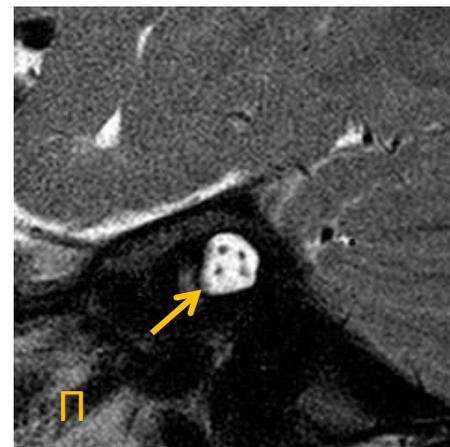
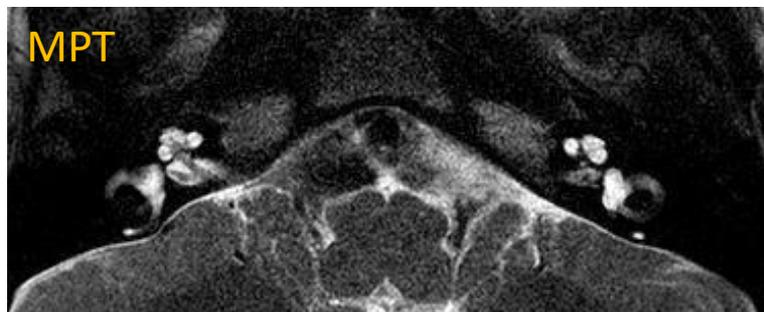
27% отказались от выполнения КИ

Но...

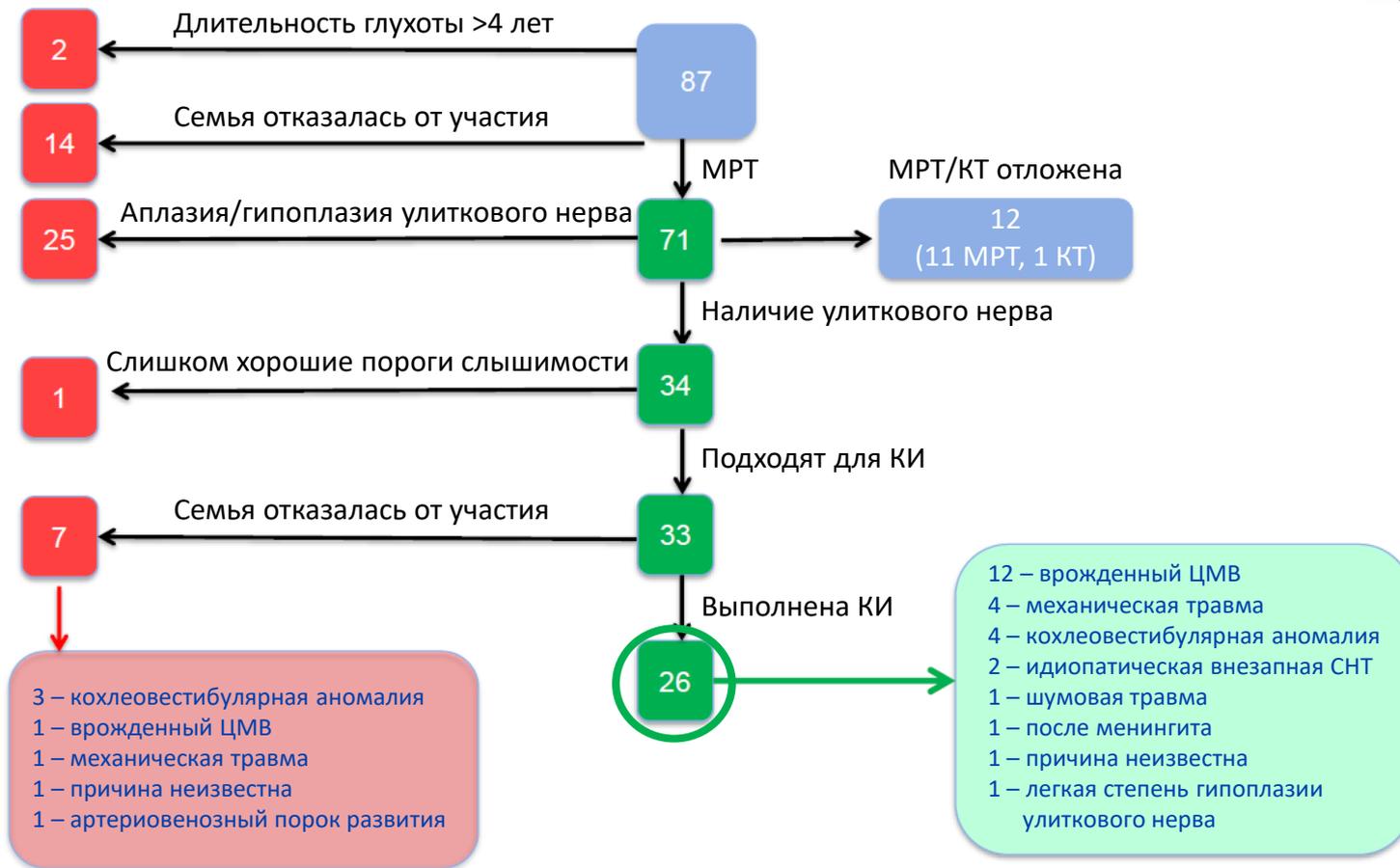


У 35% обнаружена аплазия улиткового нерва

Аплазия улиткового нерва



Итого...



Кохлеарная имплантация выполнена у **33%** детей

Итого...

Риск прогрессирования

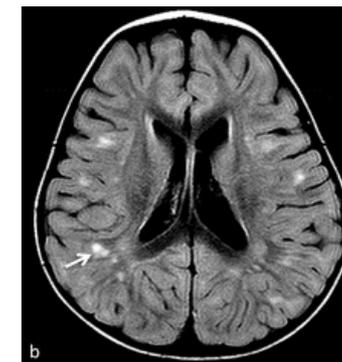
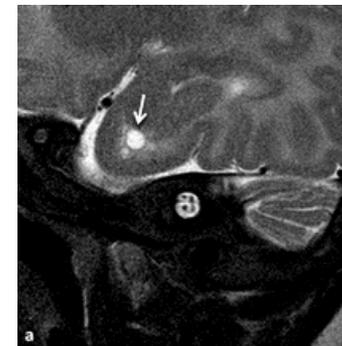
Внезапное постлингвальное начало

- 12 – врожденный ЦМВ
- 4 – механическая травма
- 4 – кохлеовестибулярная аномалия
- 2 – идиопатическая внезапная СНТ
- 1 – шумовая травма
- 1 – после менингита
- 1 – причина неизвестна
- 1 – легкая степень гипоплазии улиткового нерва

Кохлеарная имплантация выполнена у **33%** детей

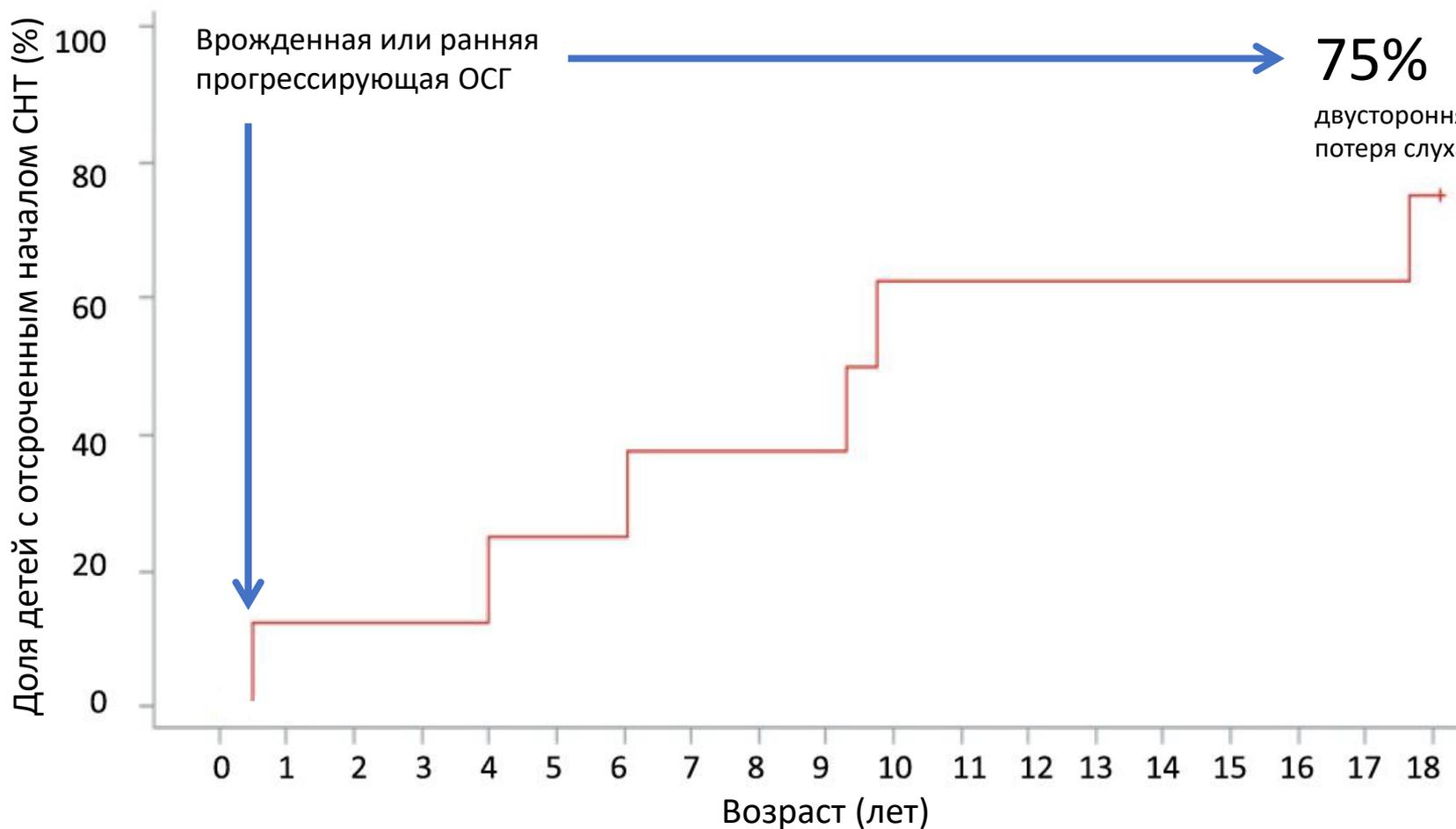
Врожденный ЦМВ и ОСГ*

- У **22%** всей когорты
 - встречается почти так же часто, как аплазия/гипоплазия улиткового нерва
- У **46%** имплантированных



*односторонняя глухота

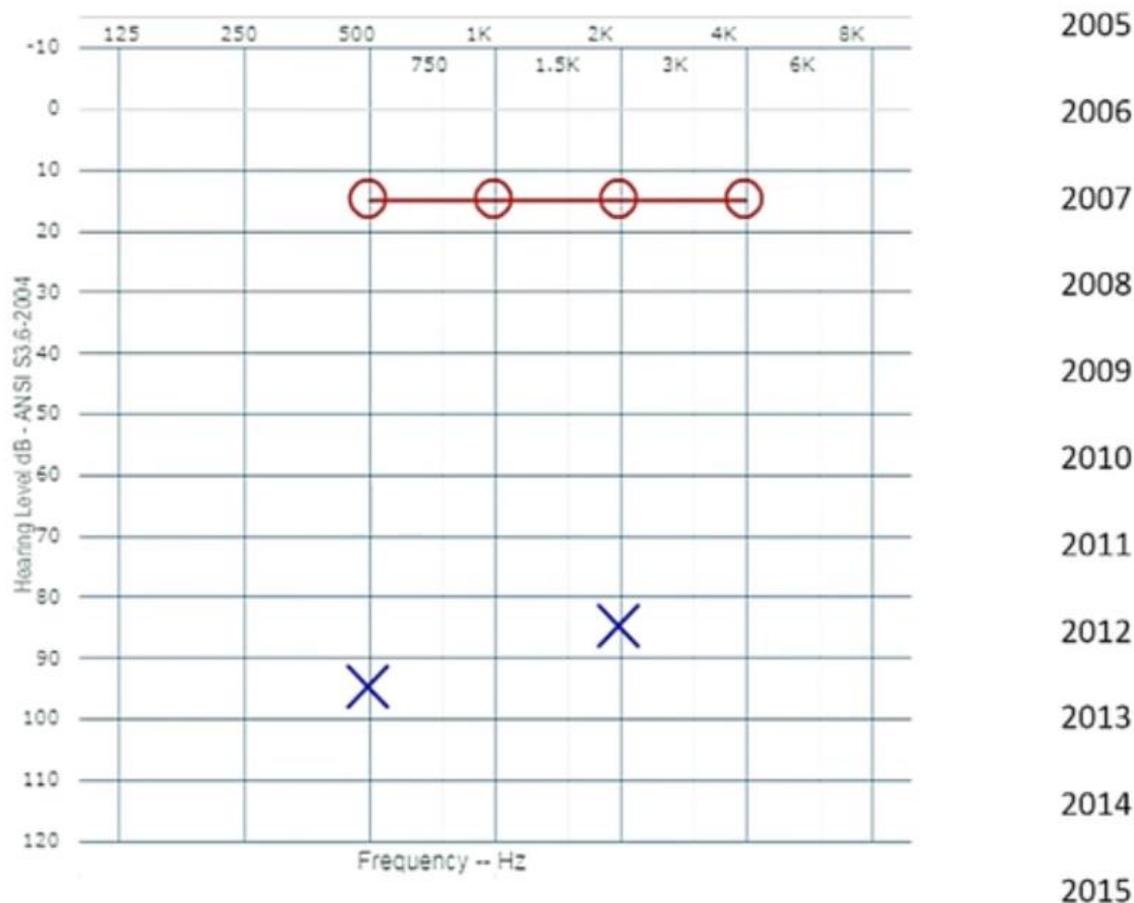
Прогрессирование ОСГ при вЦМВ* и переход в двустороннюю глухоту



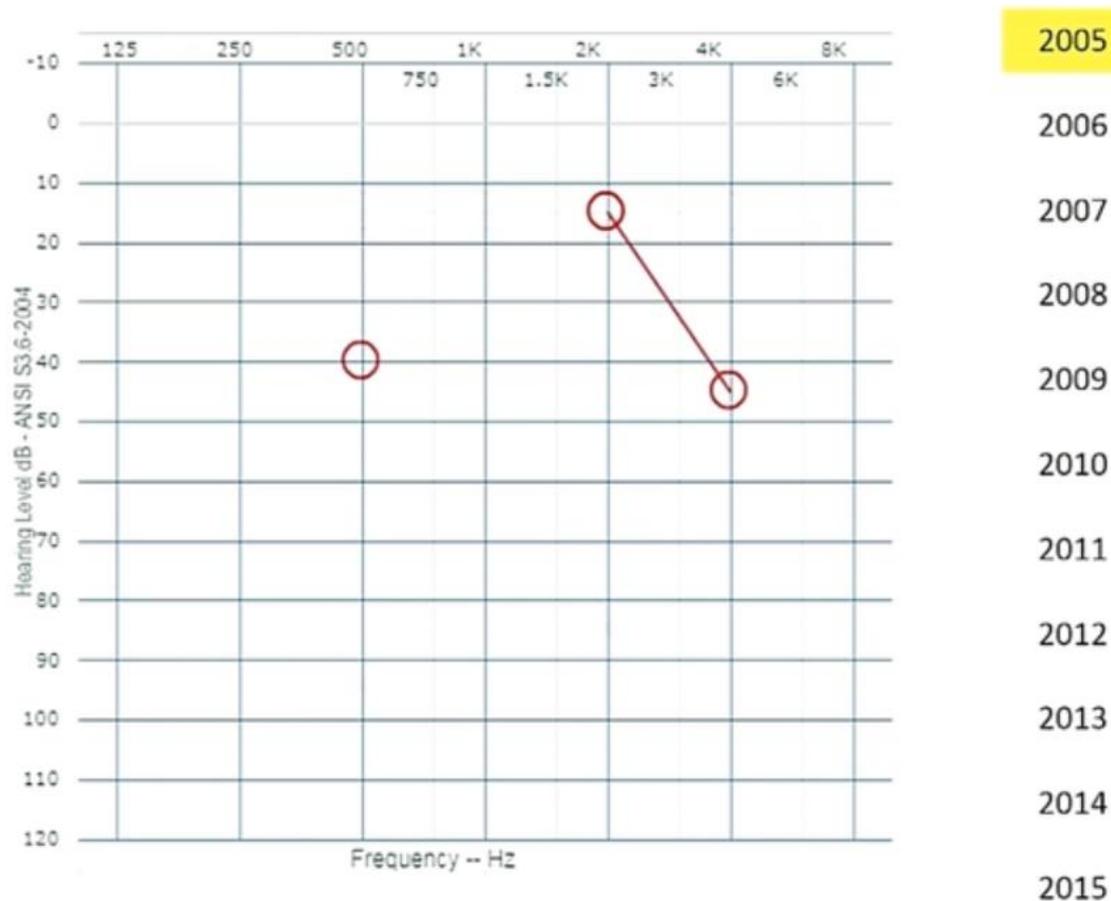
*врожденный цитомегаловирус

Lanzieri et al. Pediatrics 2017

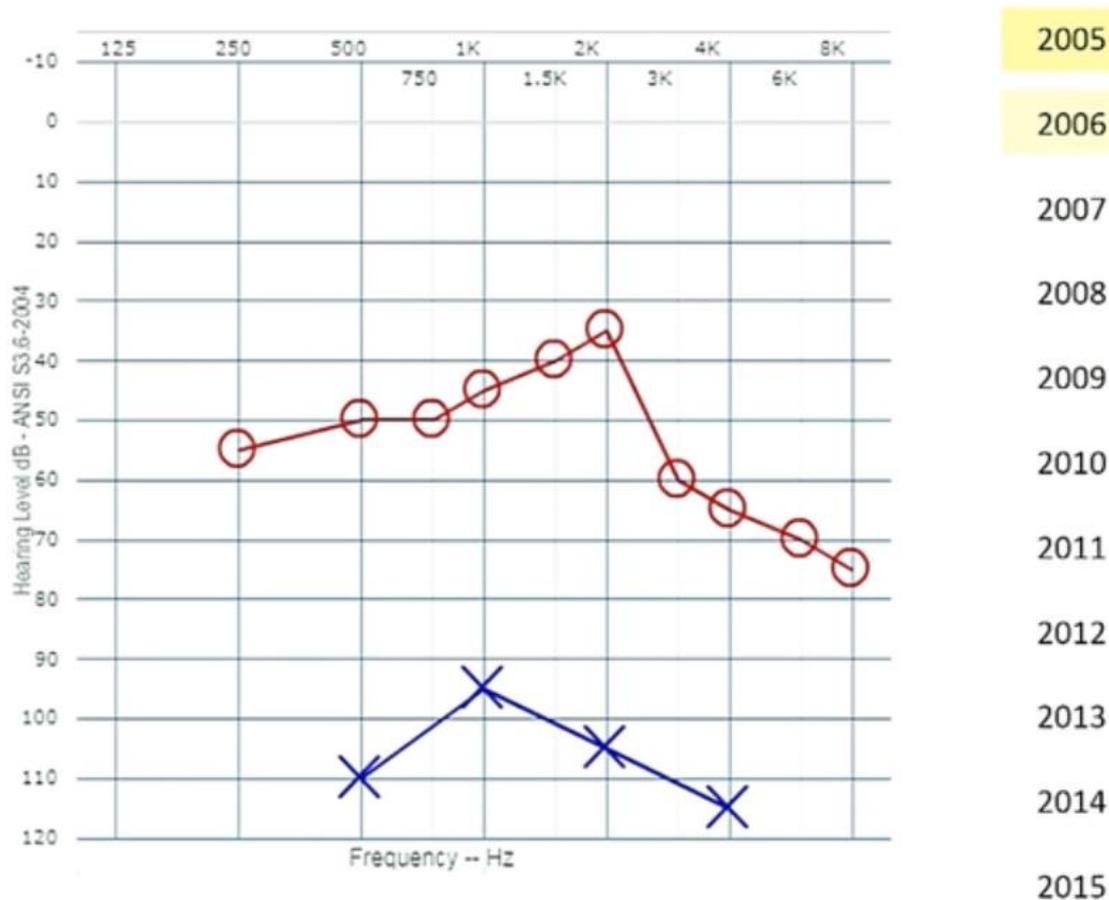
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



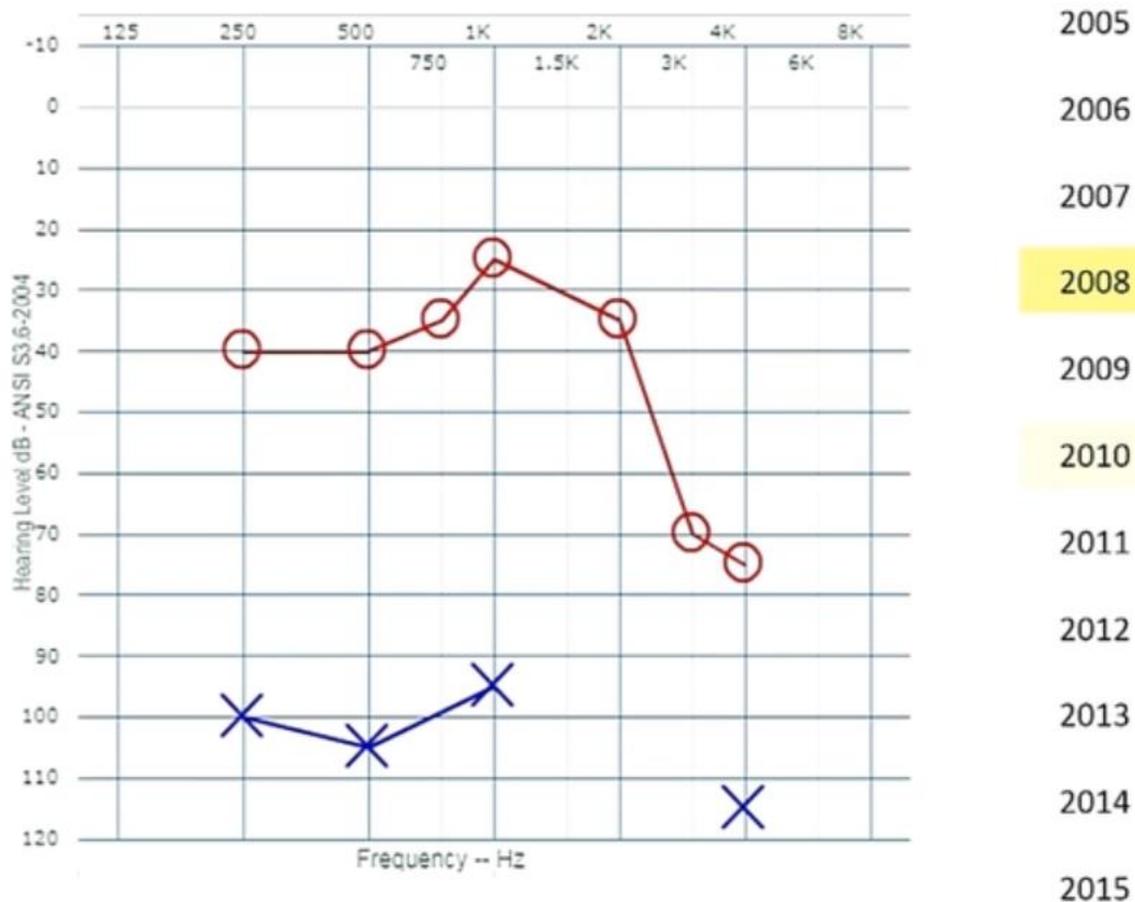
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



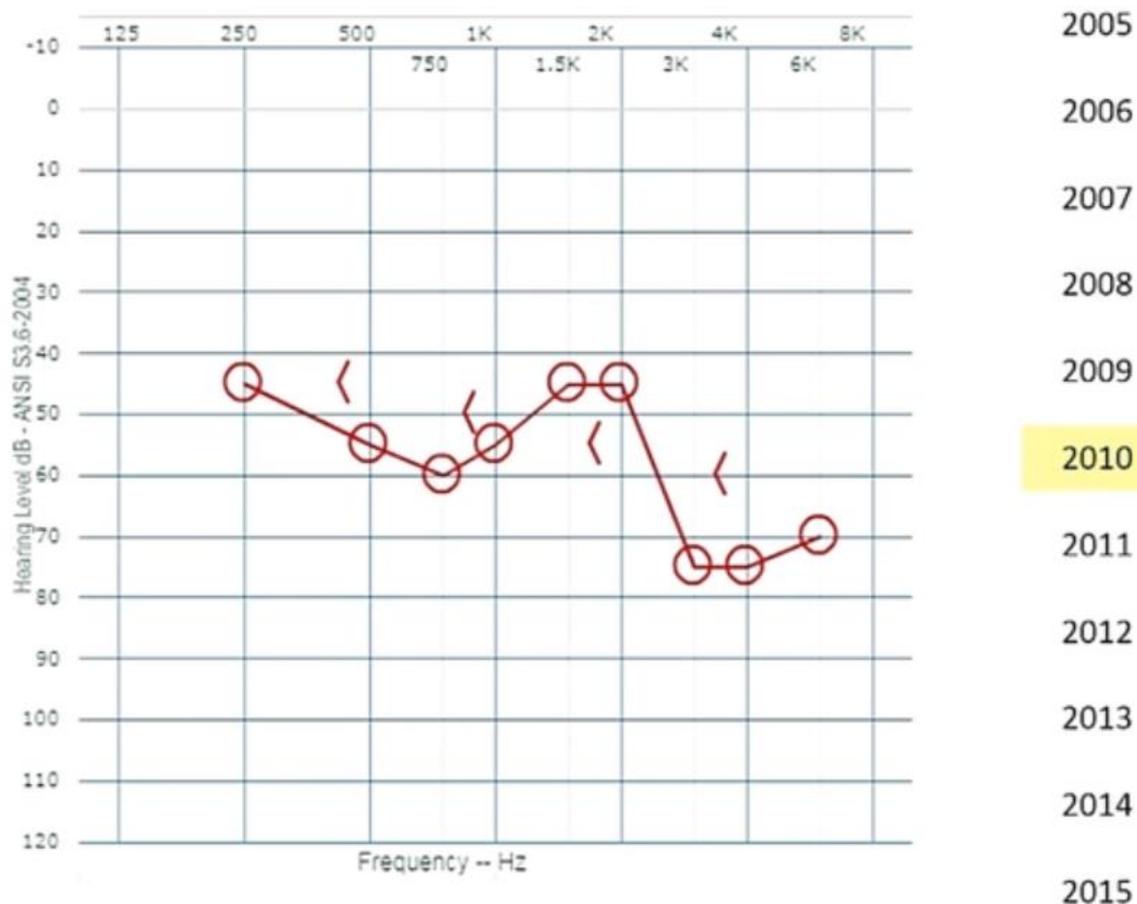
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



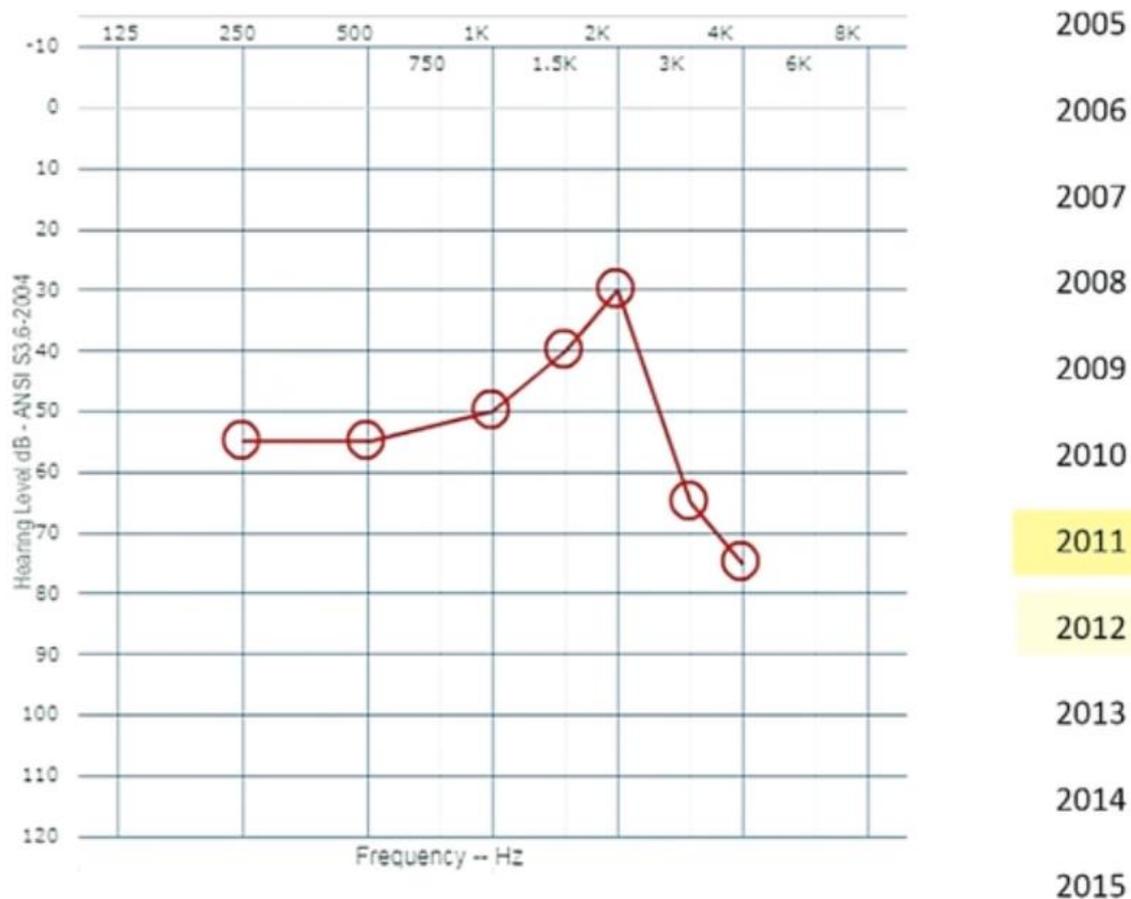
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



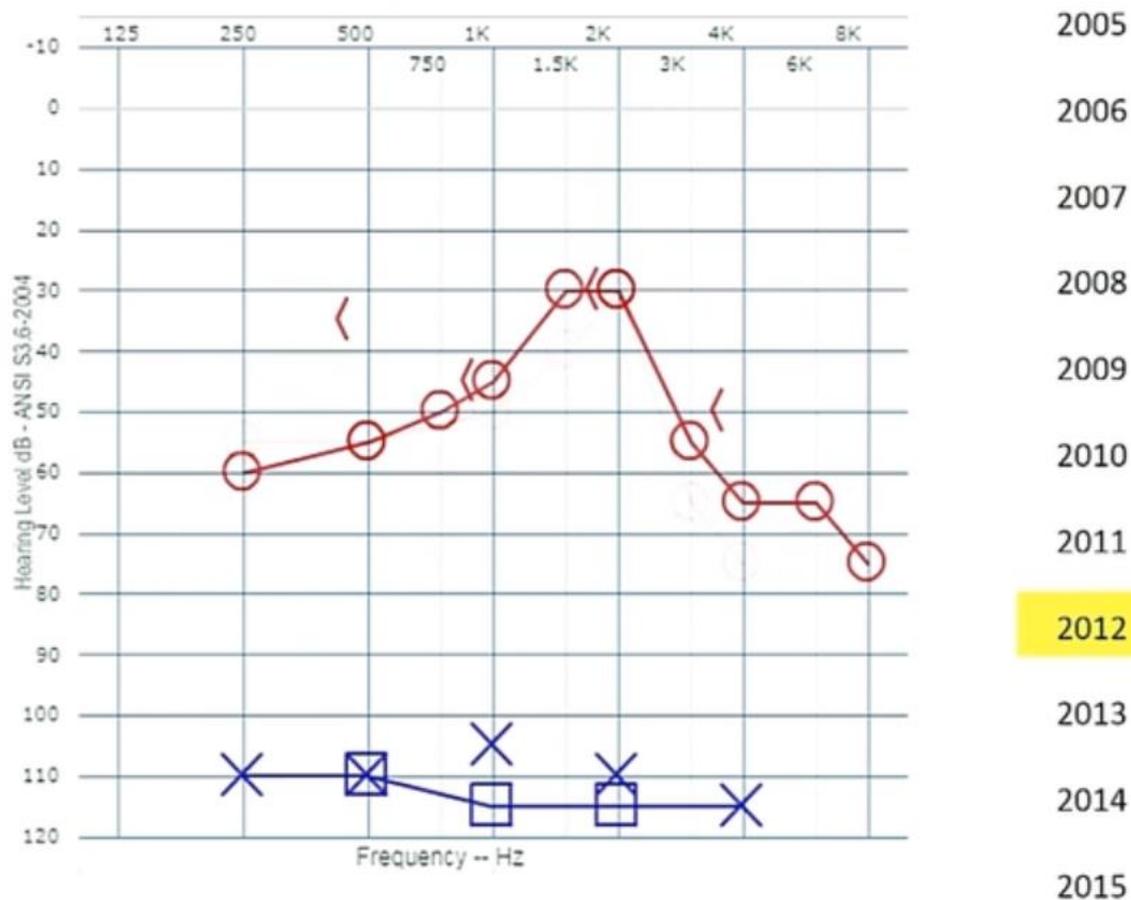
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



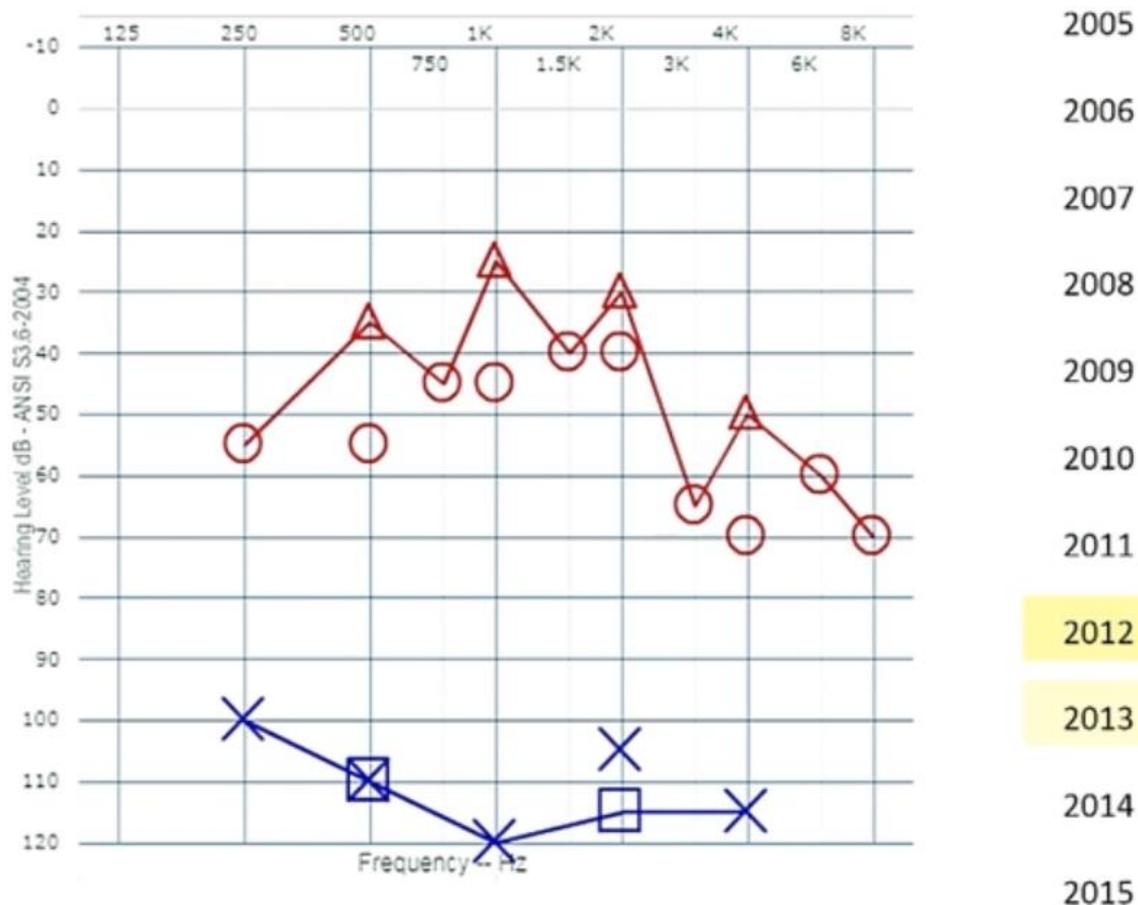
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



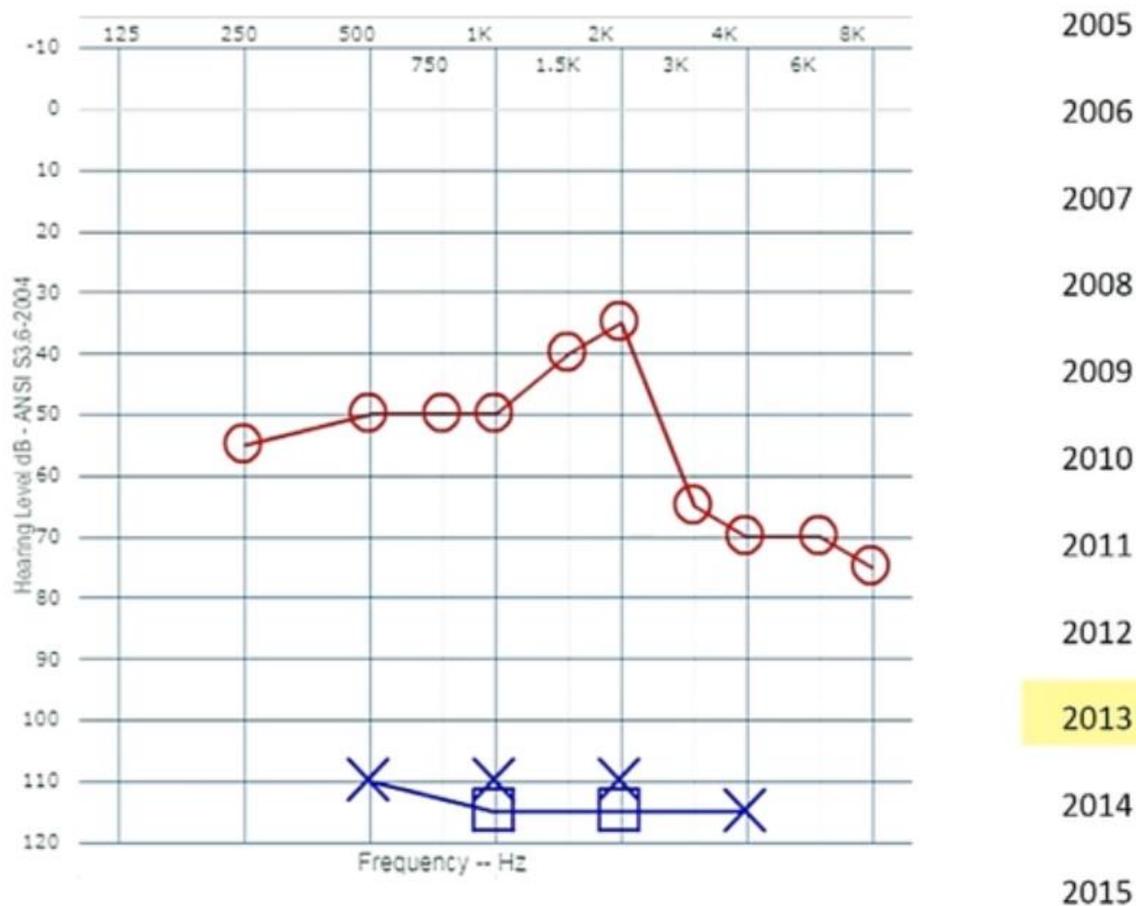
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)

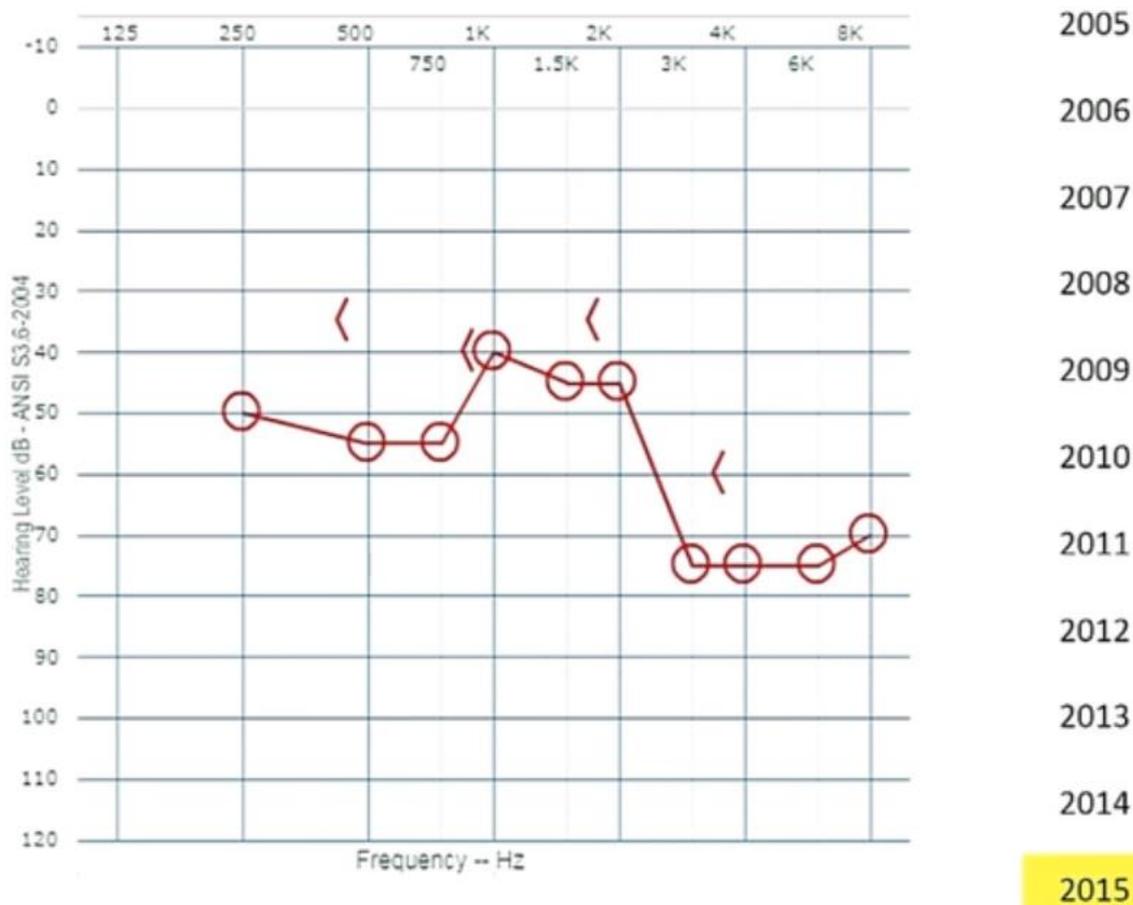


Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)

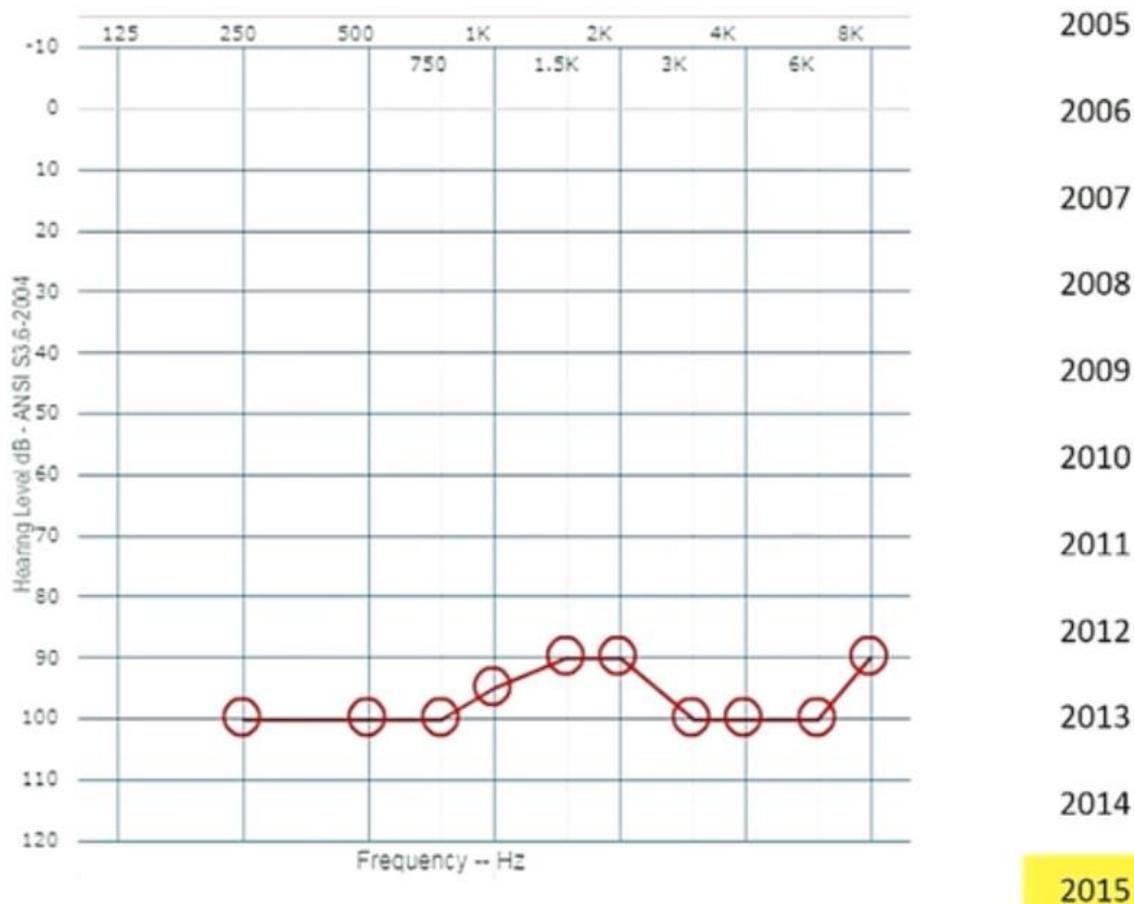


2013

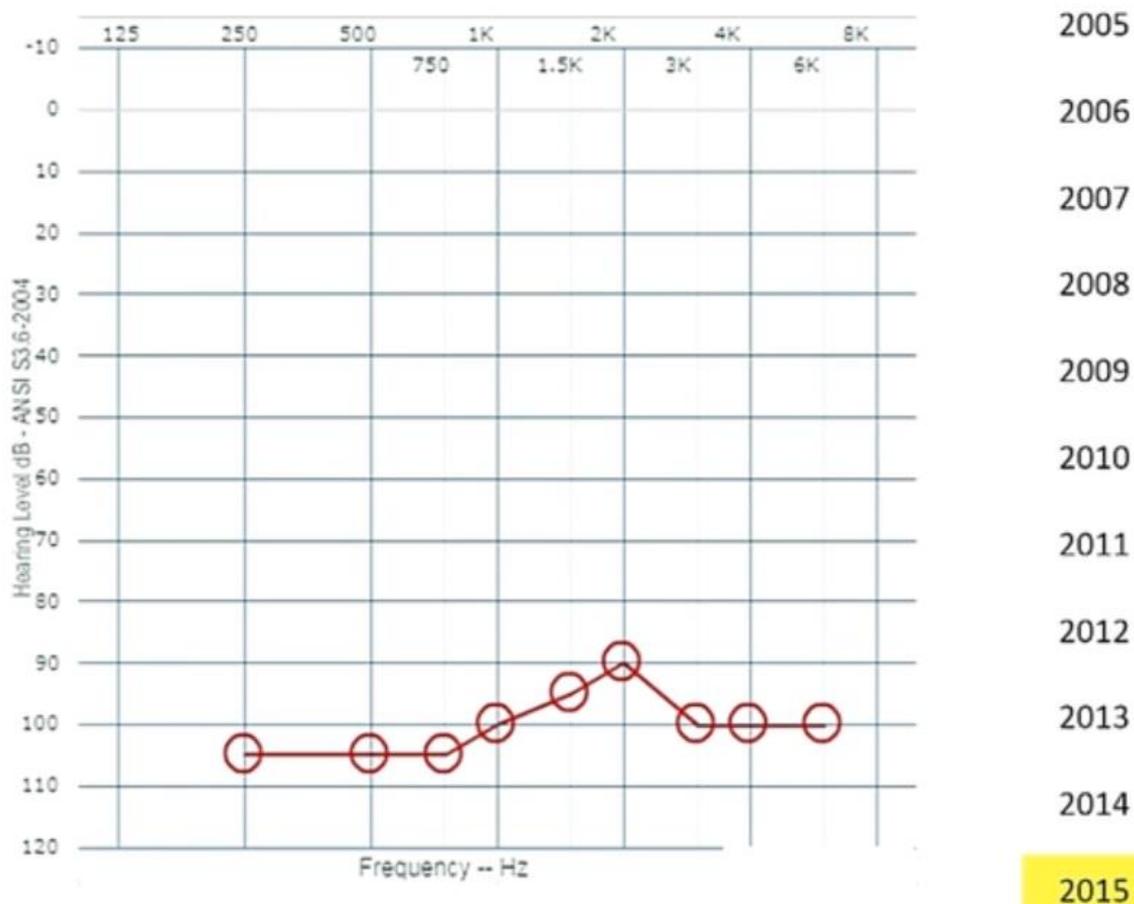
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



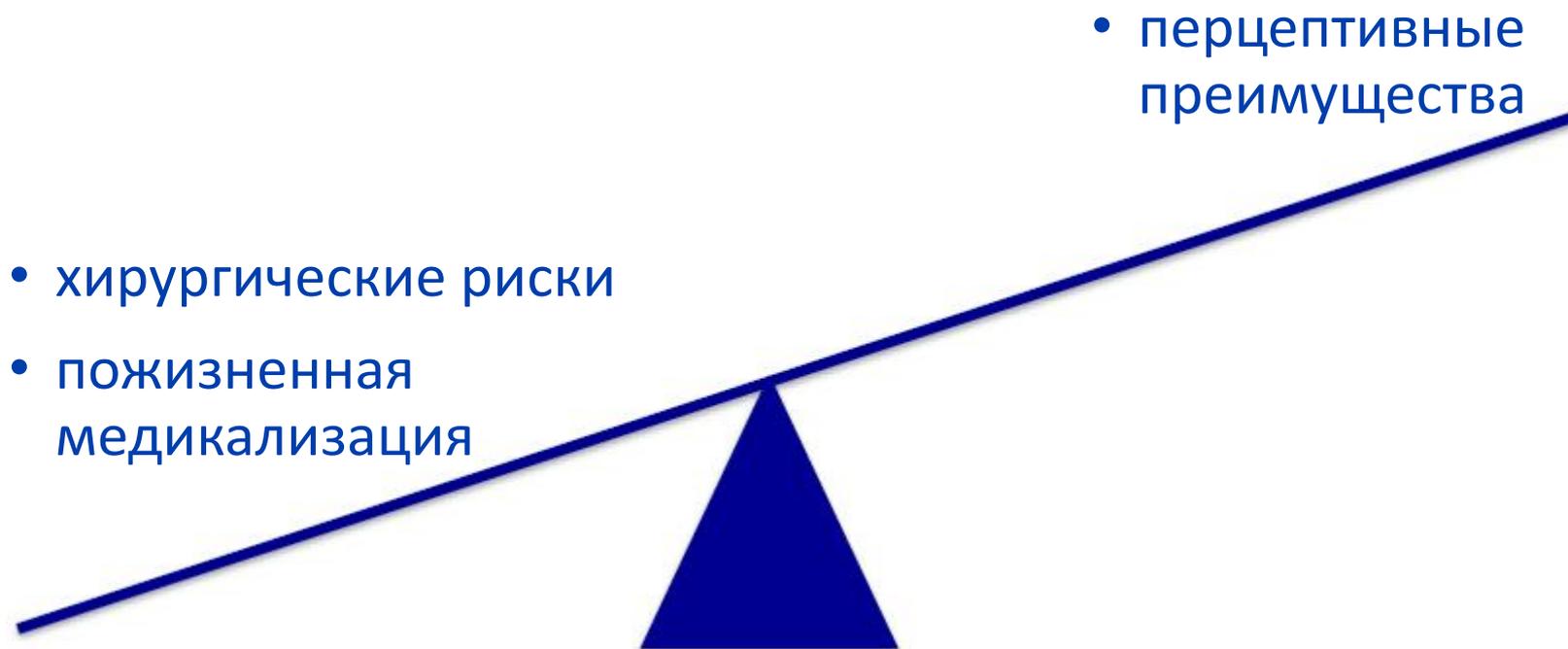
Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



Пример прогрессирования тугоухости при вЦМВ (октябрь 2005 – сентябрь 2015)



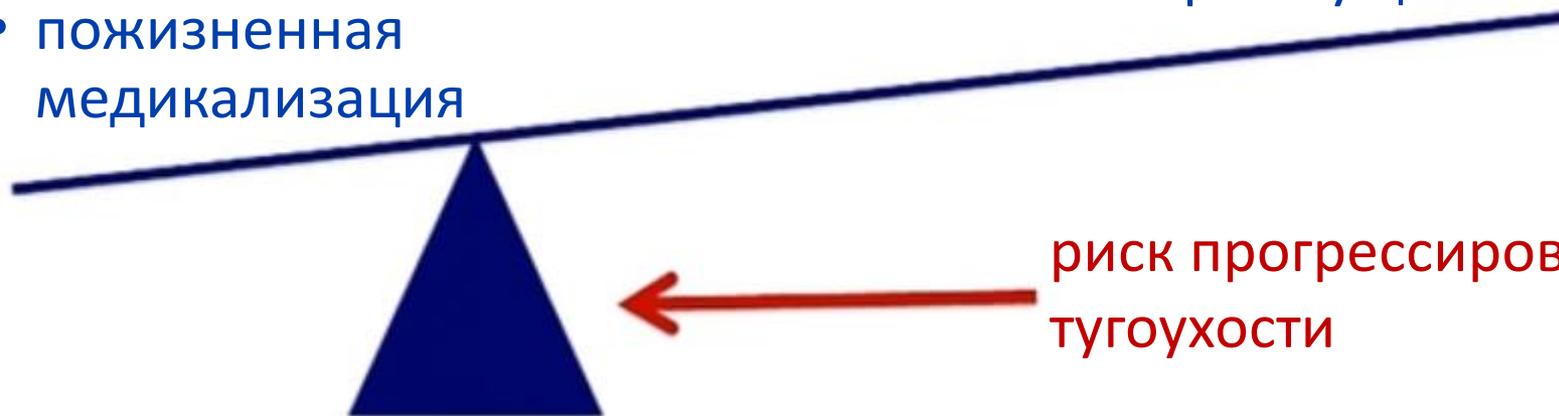
Принятие имплантов при ОСГ



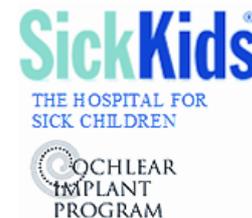
Принятие имплантов при ОСГ

- хирургические риски
- пожизненная медикализация

- перцептивные преимущества

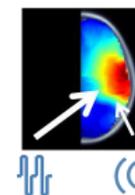
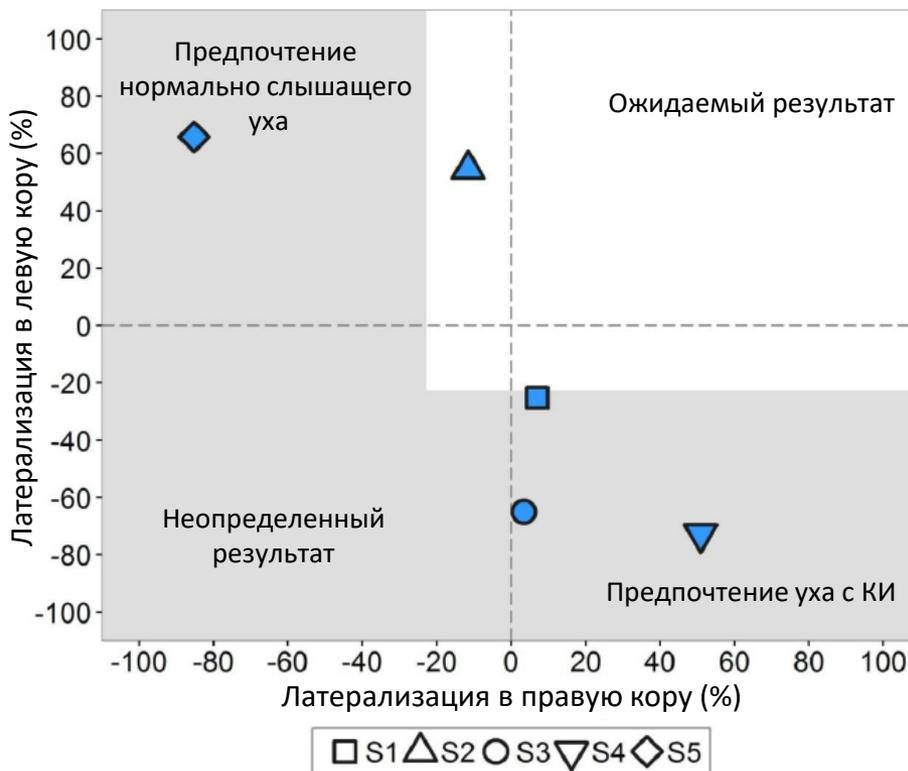
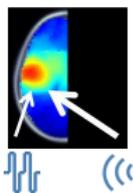


Импланты при ОСГ



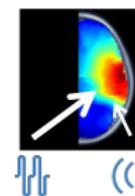
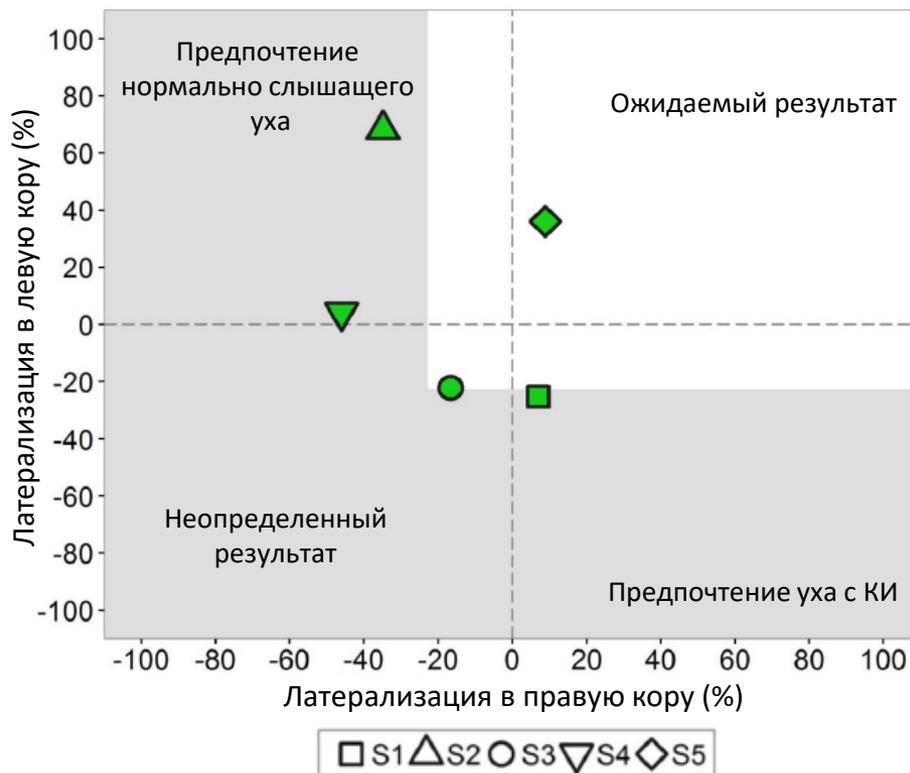
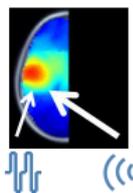
- 1/3 – отказ от КИ, 1/3 – аплазия улиткового нерва, 1/3 – вЦМВ
- риск прогрессирования, внезапное начало

Пример неожиданного восстановления корковой латерализации при ОСГ (см. также следующие 2 слайда)



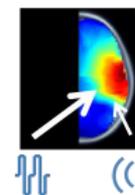
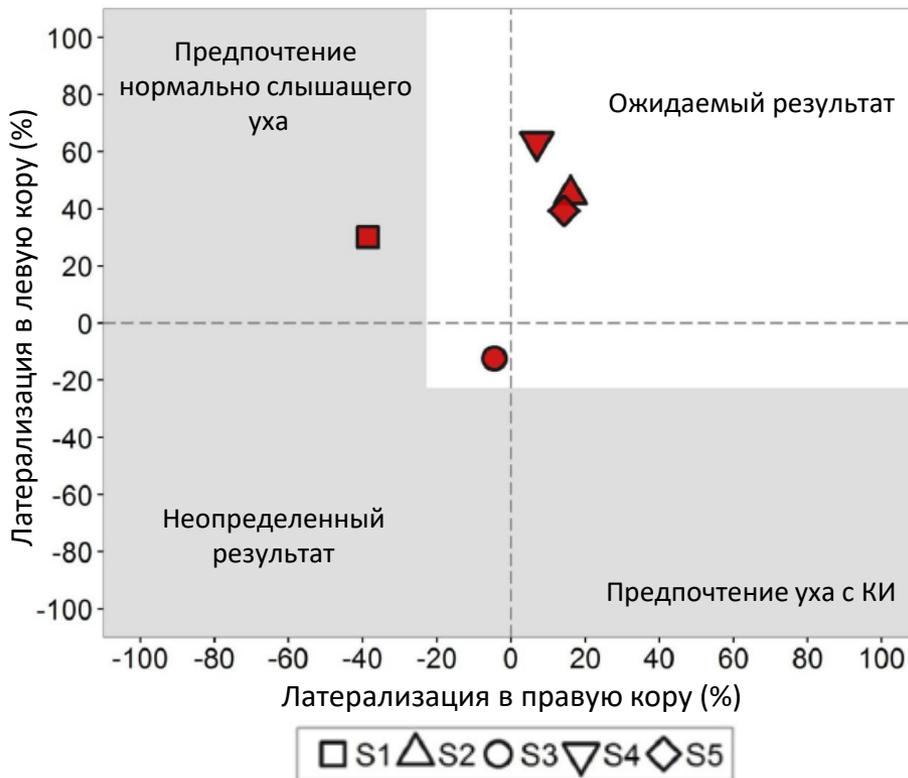
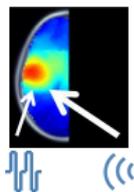
● Острая стимуляция 0,5±0,7 недели
 ● Ранняя хронич. стимуляция 1,1±0,2 месяца
 ● Хронич. стимуляция 5,8±3,4 месяца

Пример неожиданного восстановления корковой латерализации при ОСГ (см. также следующий слайд)



● Острая стимуляция 0,5±0,7 недели
● Ранняя хронич. стимуляция 1,1±0,2 месяца
● Хронич. стимуляция 5,8±3,4 месяца

Пример неожиданного восстановления корковой латерализации при ОСГ (см. также следующий слайд)



- Острая стимуляция 0,5±0,7 недели
- Ранняя хронич. стимуляция 1,1±0,2 месяца
- Хронич. стимуляция 5,8±3,4 месяца

Восстановление латерализации волны P1 в височных долях

Активность источника волны P1



Длительность периода стимуляции →

Это свидетельство огромных резервов пластичности центральной нервной системы.

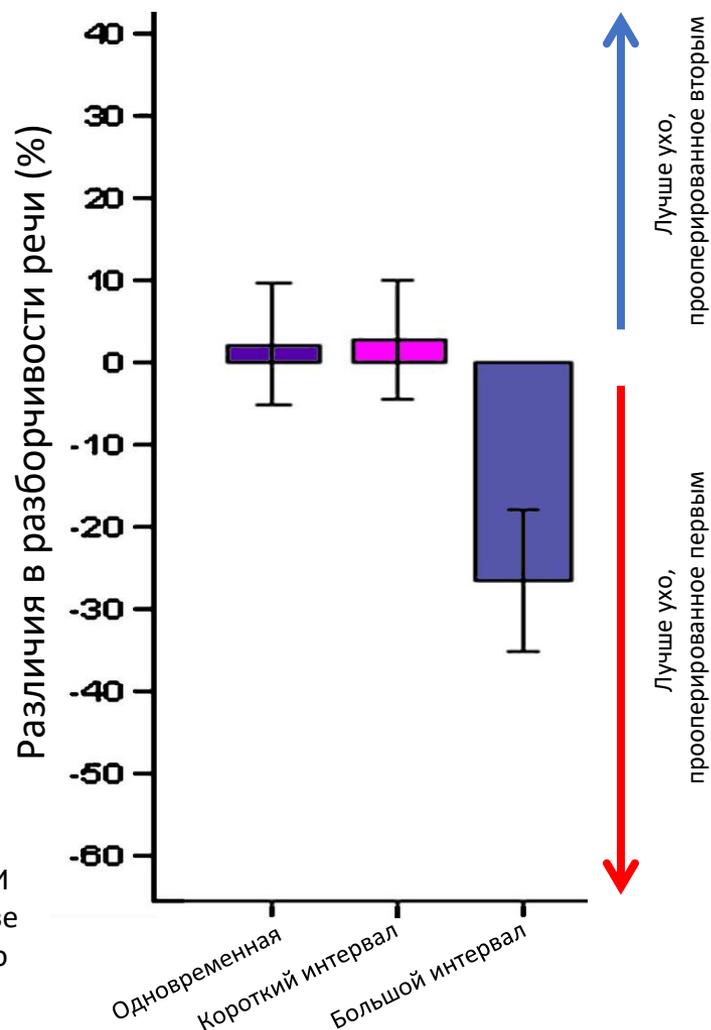
КИ при врожденной ОСГ

- Критический фактор – период депривации
- Аномальную корковую латерализацию можно **преодолеть**
- Кохлеарная имплантация – многообещающий метод вмешательства у детей с врожденной односторонней глухотой

Функциональные последствия?



Асимметрия и разборчивость речи

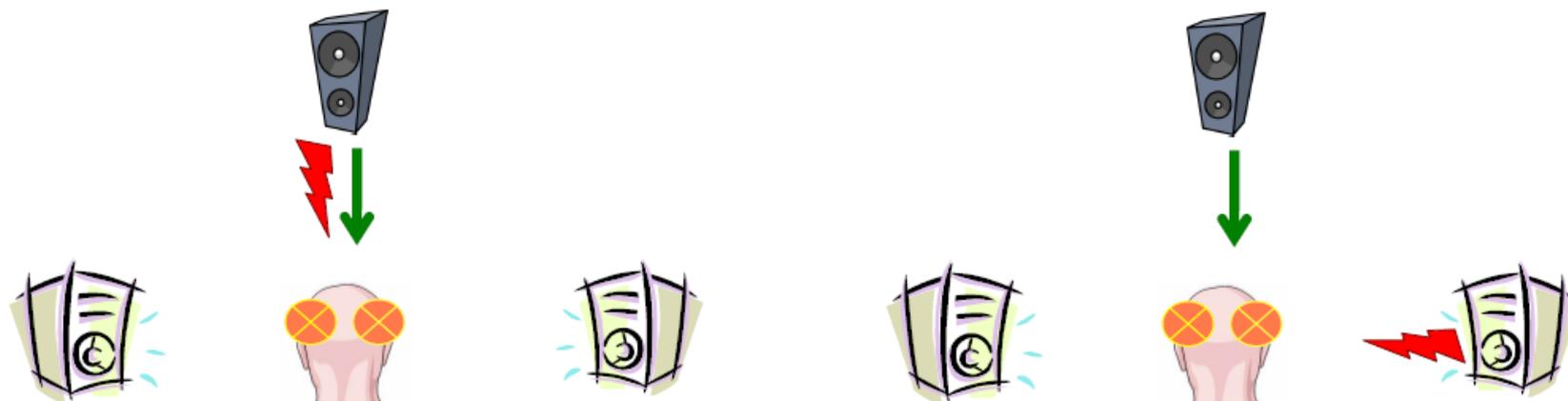


При последовательной двусторонней КИ дети безоговорочно выбрали в качестве предпочтительного то ухо, которое было прооперировано первым.

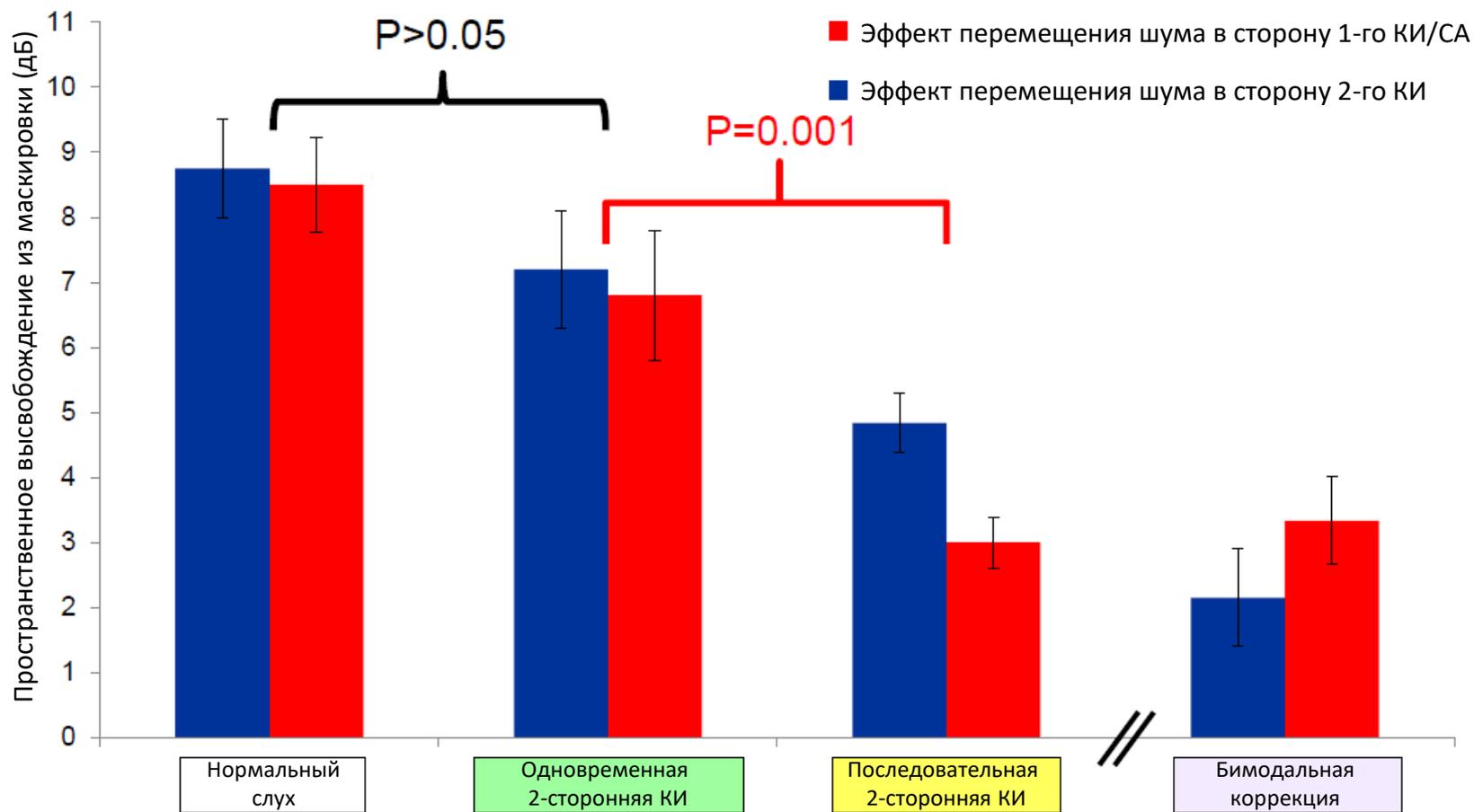
(*Otolneurotol.* 2000)

Пространственное высвобождение из маскировки

Сравнение разборчивости речи при предъявлении шума под углом 0° и 90°

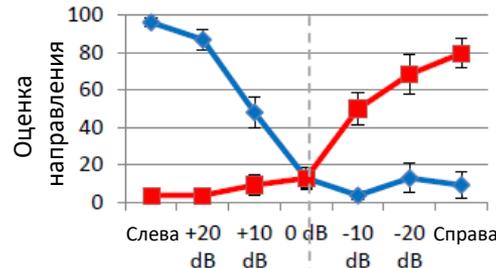


Различия пространственного высвобождения из маскировки

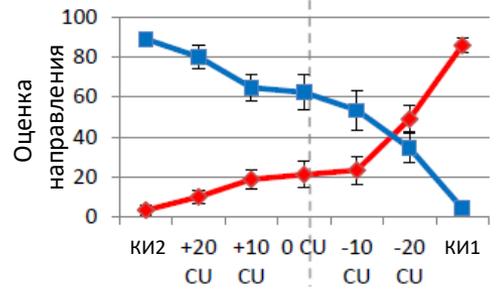


Межушная разность уровней и времени

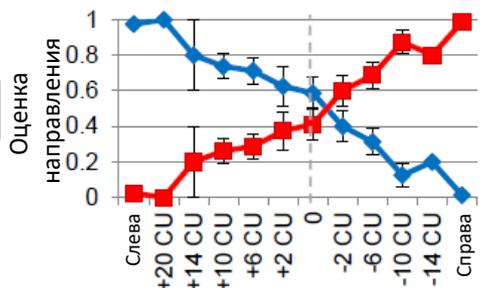
Нормальный слух



Последовательная 2-сторонняя КИ

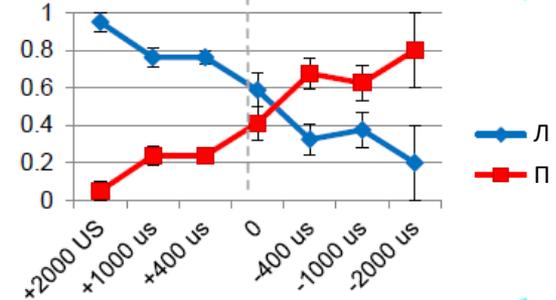
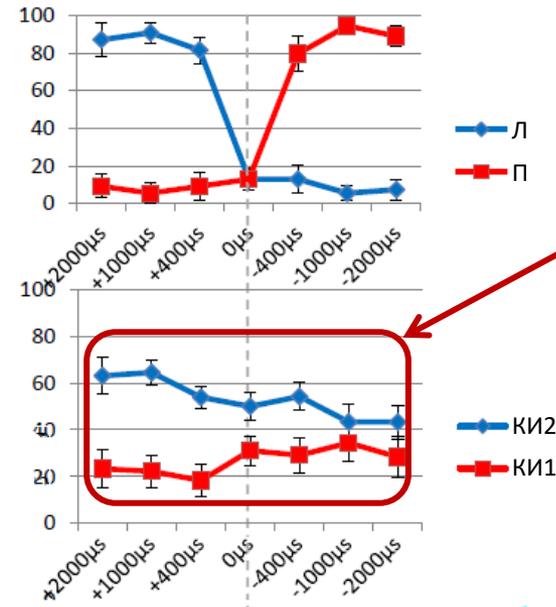


Одновременная 2-сторонняя КИ



При последовательной КИ отсутствует возможность использования межушной разности времени для локализации

Локализация на основании межушной разности **уровней**

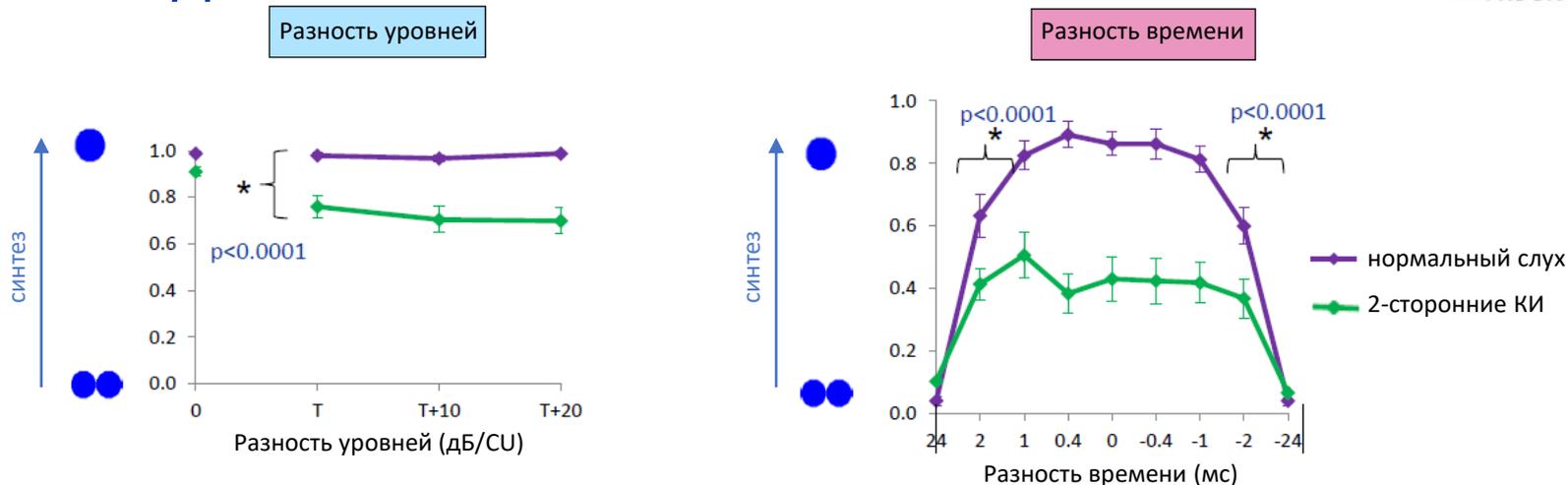


Локализация на основании межушной разности **времени**

Бинауральный синтез



Межушная разность уровней/времени и бинауральный синтез



Дети с 2-сторонними имплантами хуже воспринимают межушную разность уровней и еще хуже - межушную разность времени. Удивительно, но азимут они определяют достаточно точно.

(Steele et al. PLoS One. 2015)

Синтез образа

- Хамелеон
 - независимые глаза
 - восприятие глубины
 - хороший охотник



У хамелеона нет слияния образов, поступающих из правого и левого глаза.

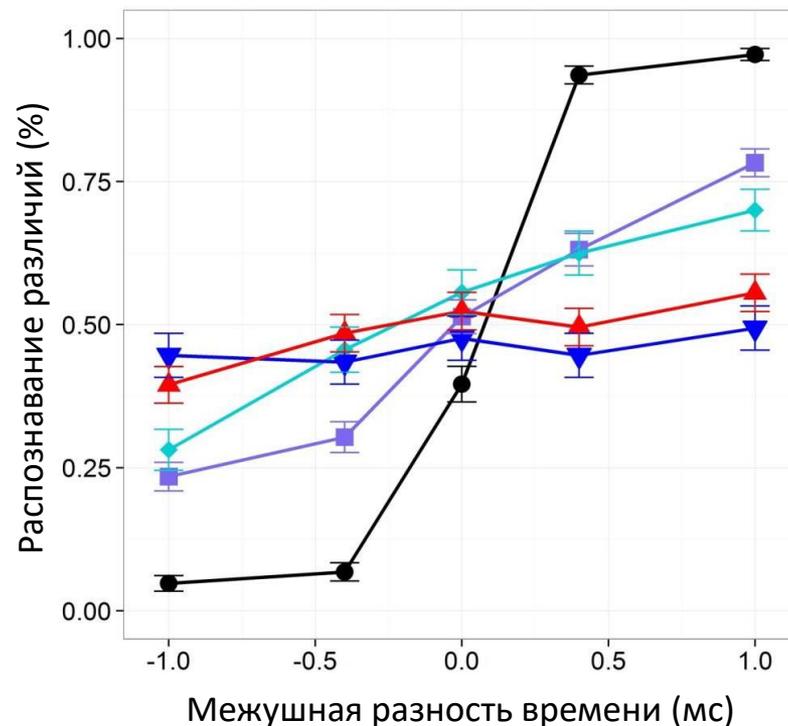
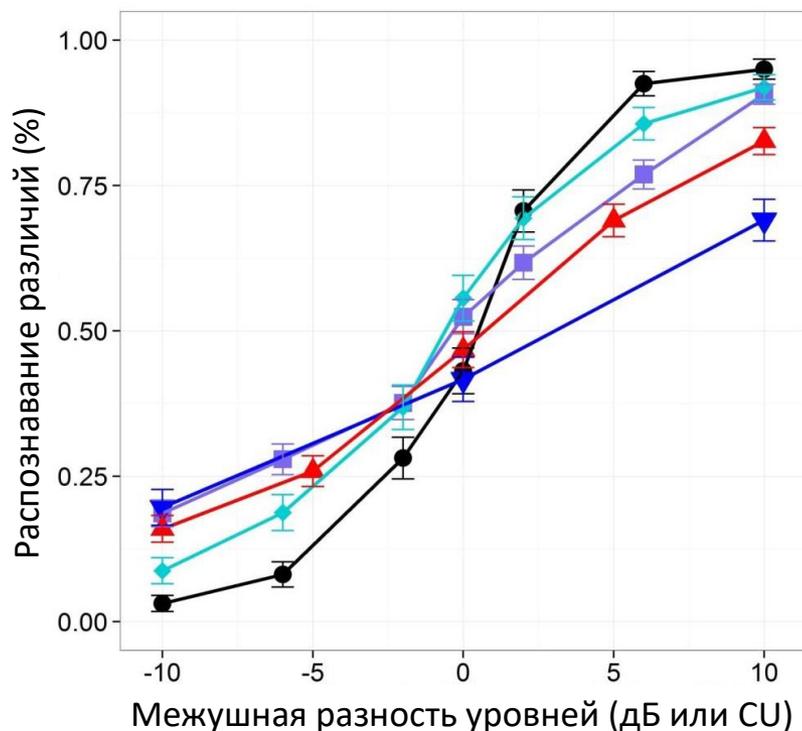
Синтез образа

- Хамелеон
 - независимые глаза
 - восприятие глубины
 - **хороший охотник**



При этом, хамелеон – отличный охотник.

Способность распознавать междушумную разность уровней и времени

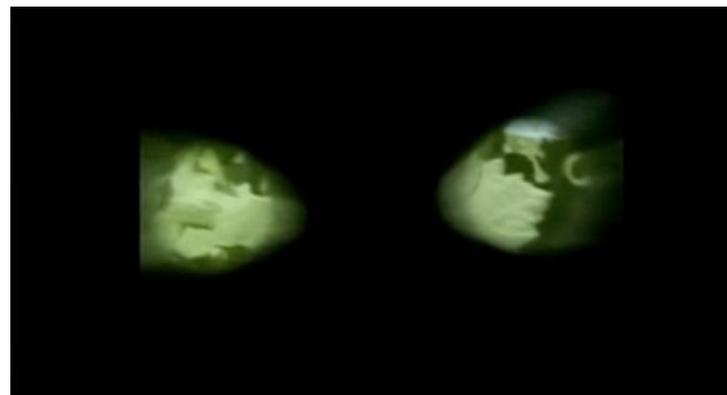


У опытных пользователей способность улавливать междушумную разность времени частично восстанавливается. Мозг учится заполнять пробелы, но это требует дополнительных усилий.

- Нормальный слух
- Одновременная 2-сторонняя КИ (опытные пользователи)
- ◆ Последовательная 2-сторонняя КИ (опытные пользователи)
- ▼ Последовательная 2-сторонняя КИ (неопытные пользователи)
- ▲ Бимодальная коррекция

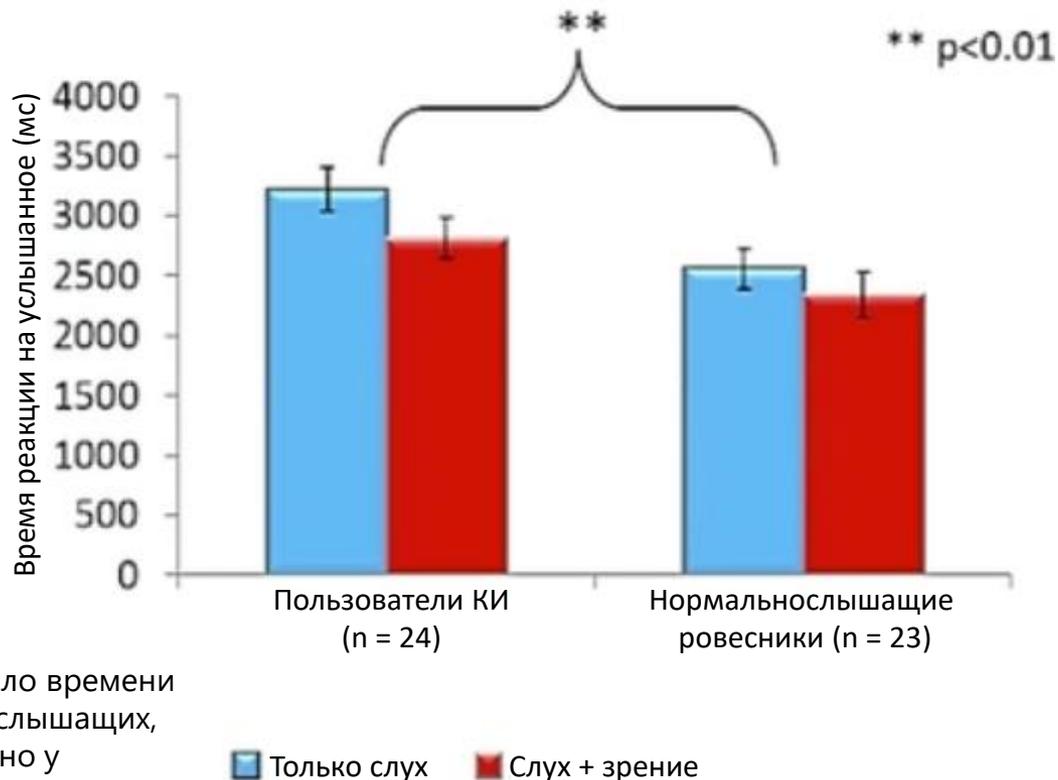
Синтез образа

- Хамелеон
 - добыча медленная
 - псевдо-синтез образов



После обнаружения добычи одним глазом происходит ее поиск вторым глазом и псевдо-синтез образов.

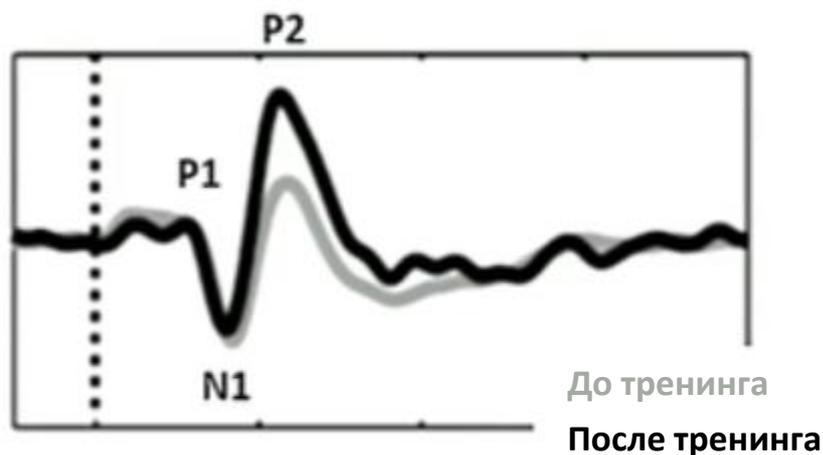
Возможность видеть выражение лица говорящего (эмоции) и время реакции



Добавление зрительной составляющей не улучшило времени реакции ни у нормальнослышащих, ни у имплантированных, но у имплантированных время реакции было дольше.

Норьян et al. *Child Neuropsychology* (2009)

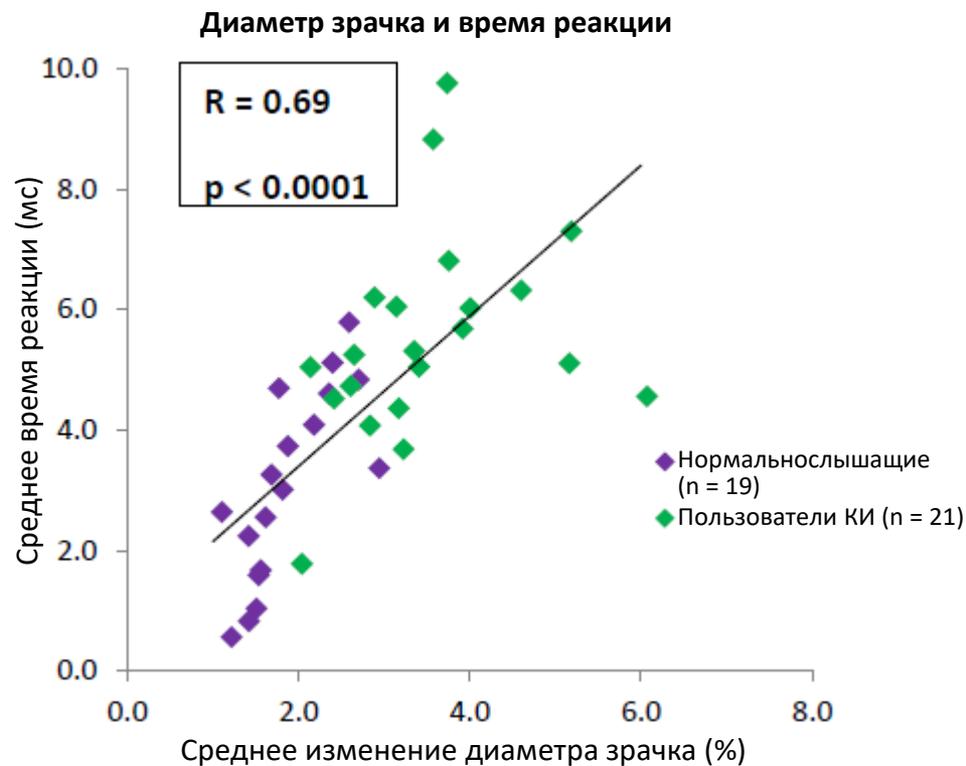
Влияние слухового тренинга на амплитуду волны P2



Tremblay et al. *Clinical Neurophysiology* (2009)

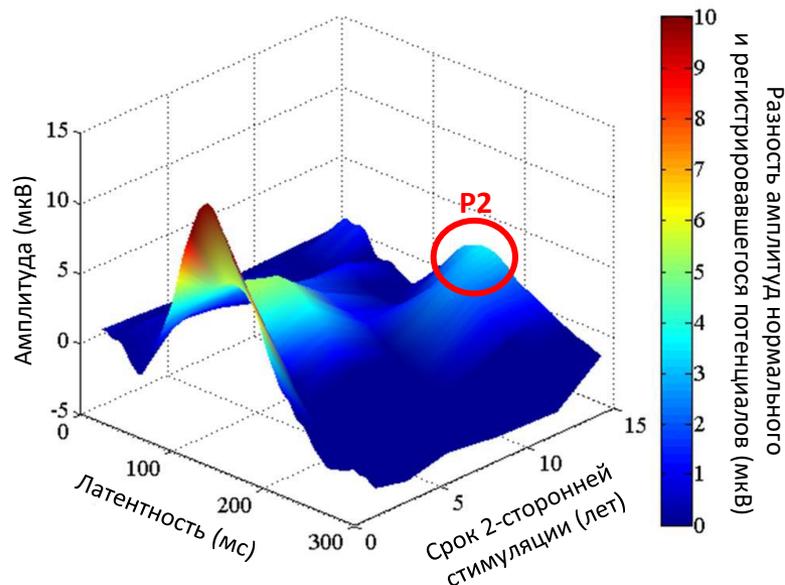
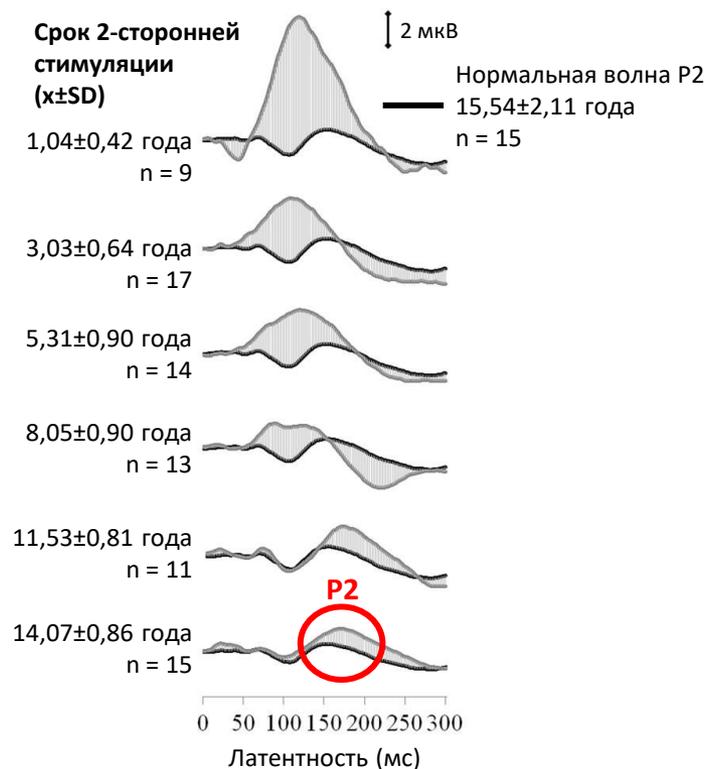
Обработка информации требует усилий

Бинауральный синтез и слуховое напряжение



Диаметр зрачка является показателем затрачиваемых усилий.

У человека со временем также может происходить псевдо-синтез образа



Jiwani et al. *Clinical Neurophysiology* (2013)

Gordon et al. *Frontiers in Auditory Cognitive Neuroscience* (2013)

Выводы

- При бимодальной коррекции не происходит истинного синтеза звуковых образов
 - отсутствует реальная временная информация
 - несопоставимое время поступления сигналов
- Для восстановления сенсорного образа необходимы усилия
 - псевдо-синтез
 - время на обработку информации
 - когнитивные ресурсы



Понимание слухового процесса

- Слуховая система полностью использует доступные сенсорные данные
- Мозгу приходится "изобретать" новые способы обработки информации
- Восстановление (синтез) слухового образа является частью факультативной эволюции, т.к. история существования нашего биологического вида до 1980-х годов не подразумевала возможность возвращения утраченного слуха

