



# Слышать двумя ушами: преимущества бинауральной обработки сигнала для пользователей слуховых аппаратов и кохлеарных имплантов

Birger Kollmeier\*

Hearing4All в сотрудничестве с факультетом медицинской физики Ольденбургского университета (D-26129 Ольденбург, Германия)

\*при участии Volker Hohmann, Mathias Dietz, Regina Baumgärtel, Stephan Ernst, Christoph Völker и др.



# Ольденбургский университет им. Карла фон Осиетски



Динамично  
развивающийся  
научный  
университет



Исследование слуха, а также...

Морская среда и  
разнообразие  
биологических видов



Возобновляемые  
источники энергии



Исследование  
нейросенсорных  
функций



Безопасность



Образование



Слышать двумя ушами: преимущества бинауральной обработки сигнала для пользователей слуховых аппаратов и кохлеарных имплантов

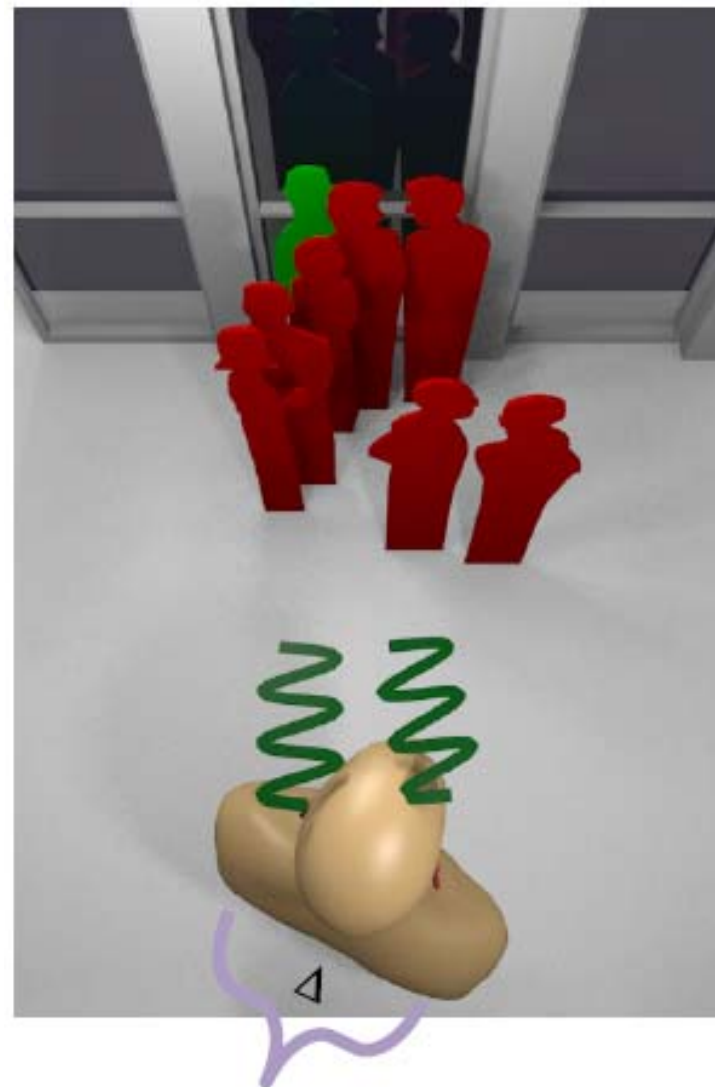
- Почему нас интересует бинауральная обработка?
- Как ее измерить?
- Как интерпретировать результаты?
- Как улучшить устройства (СА и КИ)?



# Бинауральная обработка сигнала – пространственный слух для всех

Акустически сложная обстановка  
"коктейльной вечеринки"

- Фоновый шум, реверберация
- Слабослышащие люди (18% населения) испытывают серьезные проблемы и, как следствие, избегают посещения общественных мероприятий!
- Бинауральный (двумя ушами) слух: направленное восприятие, высвобождение сигнала из реверберации, отделение полезного сигнала (речи) от шума на уровне мозга
- Специфическое бинауральное нарушение слуха



# Бинауральная обработка сигнала – пространственный слух для всех

Акустически сложная обстановка  
"коктейльной вечеринки"

- Фоновый шум, реверберация
- Слабослышащие люди (18% населения) испытывают серьезные проблемы и, как следствие, избегают посещения общественных мероприятий!
- Бинауральный (двумя ушами) слух: направленное восприятие, высвобождение сигнала из реверберации, отделение полезного сигнала (речи) от шума на уровне мозга
- Специфическое бинауральное нарушение слуха



# За бинауральность!

- Целевая группа пользователей коррекционных устройств (слуховых аппаратов и кохлеарных имплантов) постоянно увеличивается (достижения в области технологий и аудиологии)
- Бинауральные устройства обладают большими потенциальными возможностями шумоподавления (за счет расстояния между ушами)
- Даже нормальнослышащие люди могут воспользоваться некоторыми преимуществами слуховых аппаратов
  - Бинауральный направленный фильтр
  - Шумоподавление / выделение речи
  - Успешная компенсация возрастного снижения слуха

→ Необходима научная подоплека для создания "истинно" бинауральных коррекционных устройств...



Премия Президента Германии  
(2012)

# Быстрая проверка вашей способности справиться с проблемой "коктейльной вечеринки"

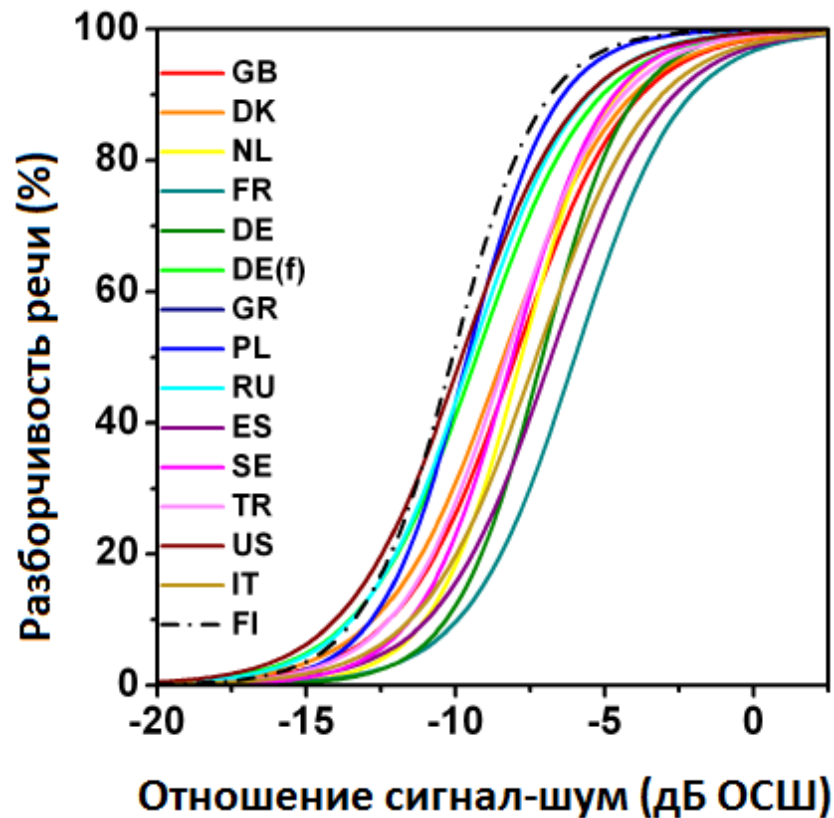
Ольденбургский фразовый тест OLSA



# Матричные фразы (Hagerman/Olsa): Многоязычный речевой тест

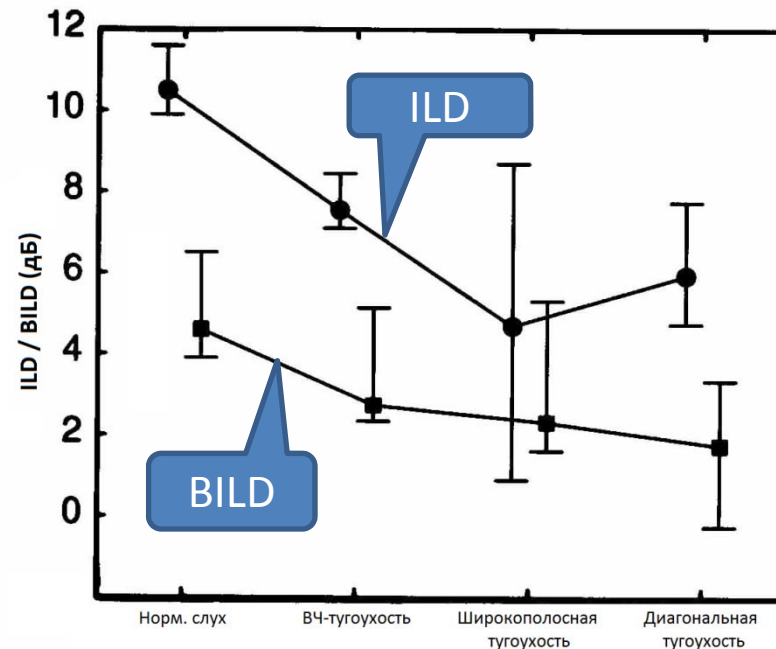
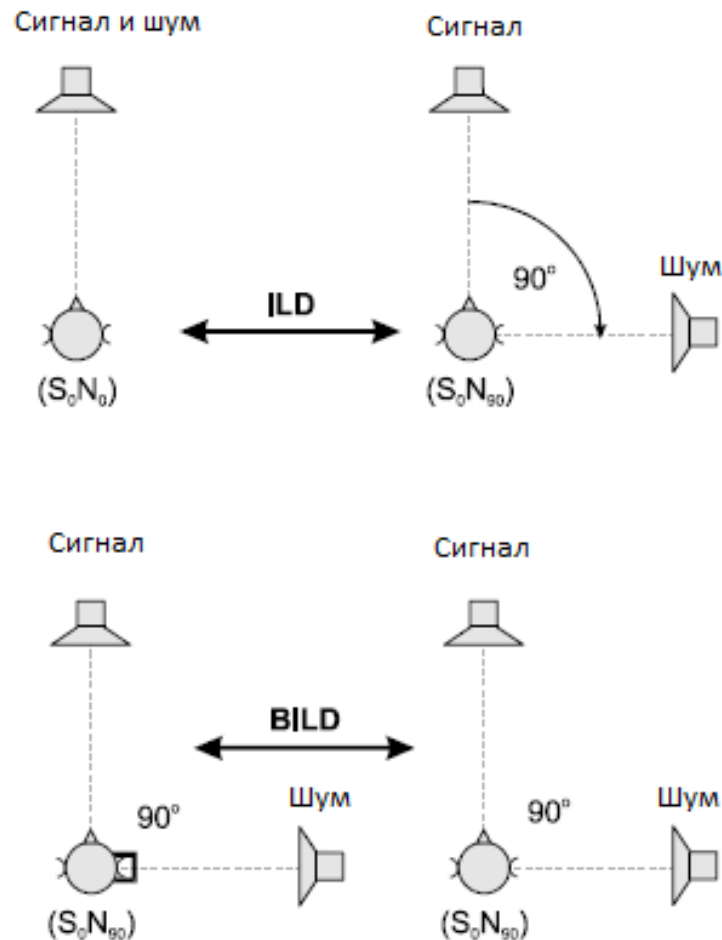
Имя собственное	Глагол	Числительное	Прилагательное	Существительное
Peter	got	three	large	desks.
Kathy	sees	nine	small	chairs.
Lucy	bought	five	old	shoes.
Alan	gives	eight	dark	toys.
Rachel	sold	four	thin	spoons.
Barry	likes	six	green	mugs.
Steven	has	two	cheap	ships.
Thomas	kept	ten	pink	rings.
Hannah	wins	twelve	red	tins.
Nina	wants	some	big	beds.

# Матричные фразы (Hagerman/Olsa): Референтные кривые



- В норме: пороги разборчивости речи (SRT) от -6,0 до -10,1 дБ ОСШ; наклон кривой от 13,0 до 17,1 %/дБ
- SRT – используется поправочный коэффициент, позволяющий сравнивать результаты, полученные для разных языков
- Формат закрытого выбора, позволяющий проводить обследование на родном языке пациента; визуальные кнопки ответа (пациент нажимает кнопки, соответствующие услышанным словам, как в таблице на предыдущем слайде)  
→ аудиологу не обязательно знать язык, на котором проводится обследование
- Действуют международные стандарты (рекомендации ICRA для многоязычных тестов)

# Бинауральное улучшение порога разборчивости речи (SRT): Разность уровней разборчивости (ILD) и бинауральная ILD

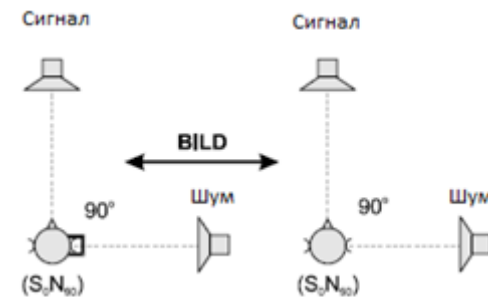


Оценка преимуществ бинаурального слуха в условиях свободного поля (имитация)

- Целевой сигнал (речь)  $S$  всегда поступает спереди  $S_0$
- Шумовая помеха  $N$  поступает спереди  $N_0$  или сбоку  $N_{90}$
- BILD: На этот раз шум подается в лучшее ухо; тем не менее, за счет бинаурального "шумоподавление" достигается эффект частичного высвобождения из маскировки

# Промежуточные выводы

- Одна из основных жалоб пользователей – восприятие речи в шуме
- Для обследования в условиях многоязычного общества\* можно воспользоваться матричным тестом
  - Версия на американском английском: Ruth Bentler и соавт.!
- Результаты коррелируют с аудиограммой, но не могут быть спрогнозированы на ее основании
- Бинауральный дефицит восприятия речи в шуме можно оценить посредством
  - ILD: Эффект "лучшего" уха + бинауральное "шумоподавление"
  - BILD: „Истинное“ преимущество бинауральной обработки за счет добавления „худшего“ уха



\*Существует русская версия OLSA

Слышать двумя ушами: преимущества бинауральной обработки сигнала для пользователей слуховых аппаратов и кохлеарных имплантов

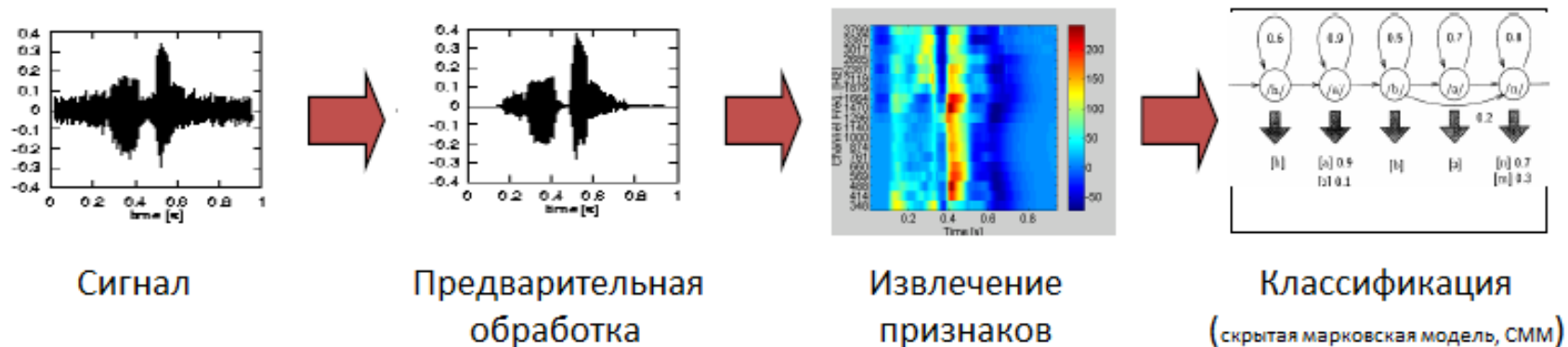
- Почему нас интересует бинауральная обработка?
- Как ее измерить?
- Как интерпретировать результаты?
- Как улучшить устройства (СА и КИ)?



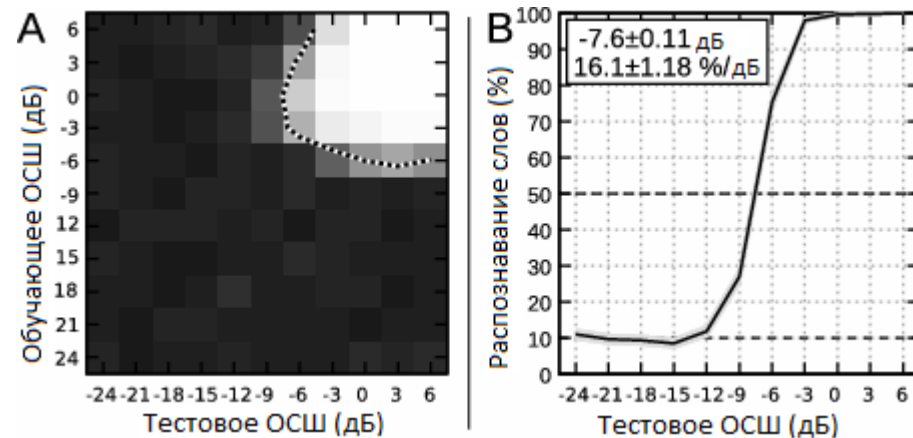
# Перекрестный эксперимент, моделирование и применение результатов



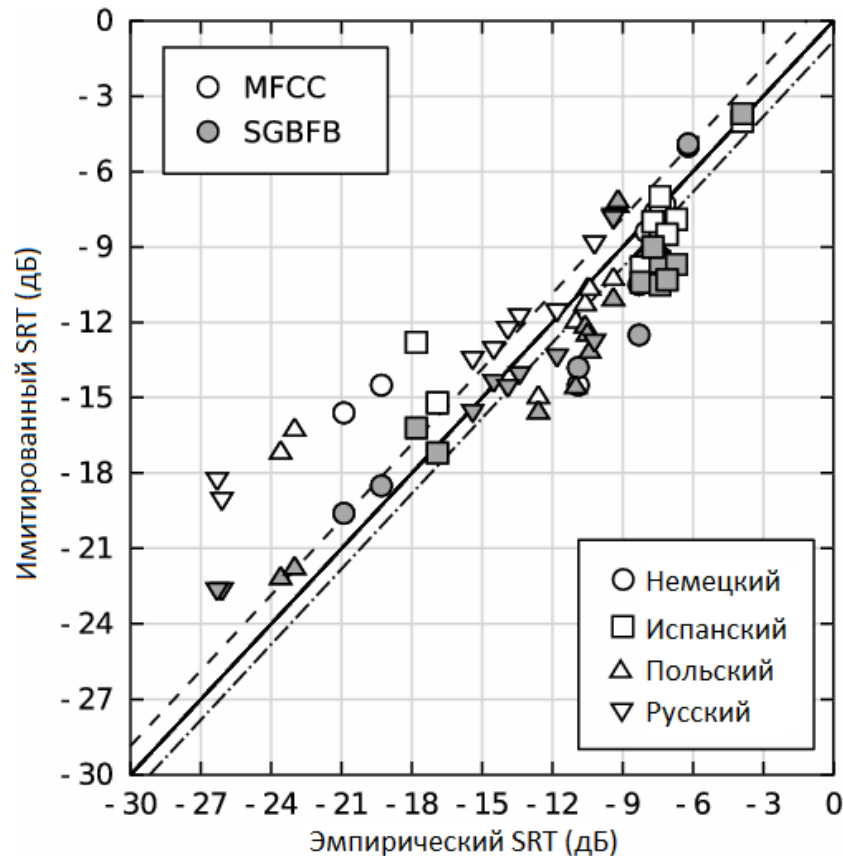
# Использование автоматического распознавания речи (ASR) / машинного обучения для моделирования человеческого поведения



- Обучение системы проводилось при различных значениях ОСШ и ограниченном наборе матричных фраз
  - Выбирались ОСШ с наименьшей вероятностью прогнозирования порога разборчивости речи
  - Алгоритм может быть использован в любом эксперименте, связанном с различением
- Система экспериментальной имитации слухового различения (FADE)

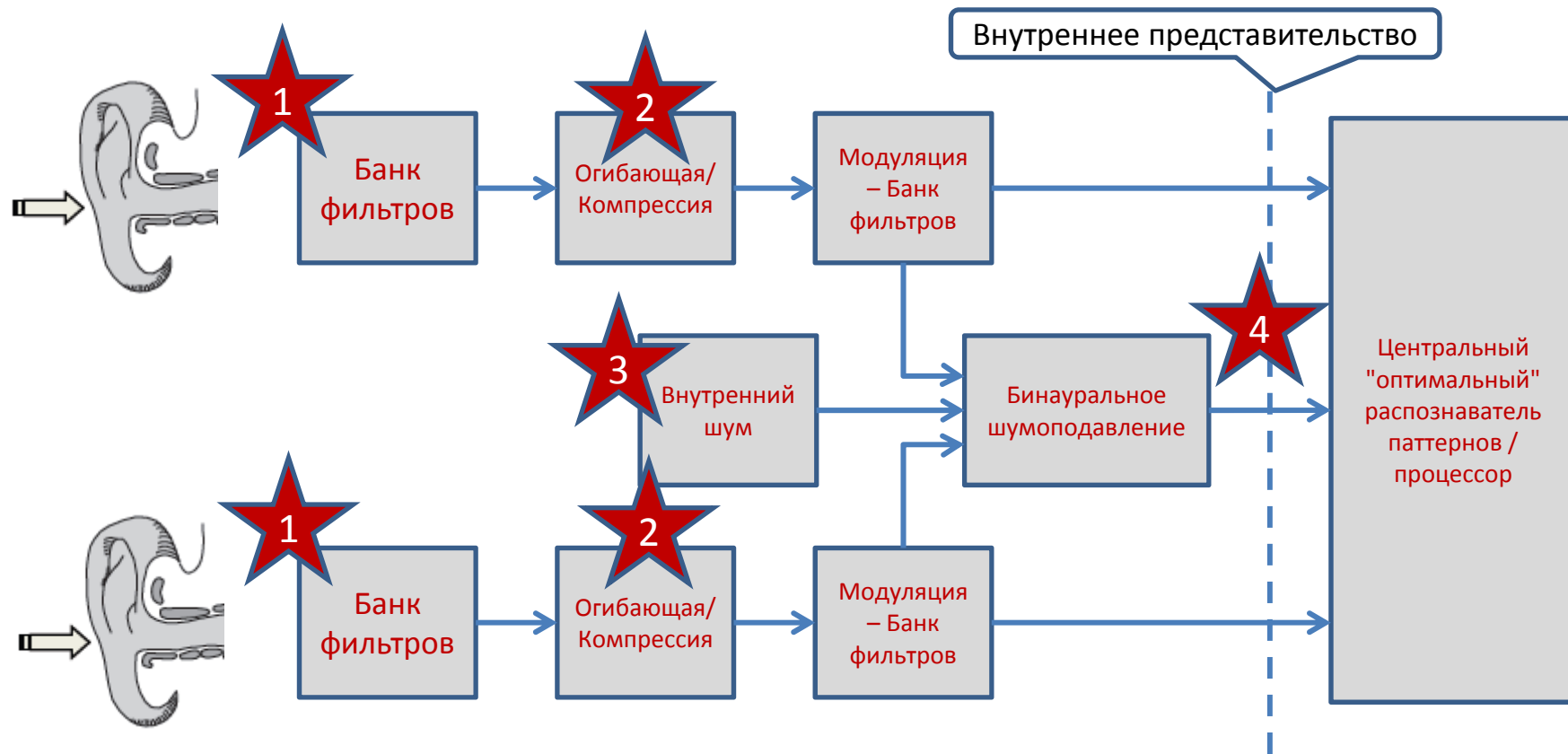


# Прогнозирование порогов разборчивости речи (SRT) для 4 языков и 7 вариантов шума



- Корреляция измеренного и предсказанного диапазонов составляет от 0,77 (польский, мел-кепстральный коэффициент - MFCC) до 0,95 (русский, разделяемый банк фильтров Габора - SGBFB)
- Модель, объясняющая особенности разборчивости речи для разных языков, дикторов, и шумов у нормальнослышащих и слабослышащих людей

# Ухо с точки зрения моделирования







Модель "эффективной" обработки в слуховой системе и нарушений



*Dau, Kollmeier, Kohlrausch, 1997; Zerbs, 2000; Kollmeier, 2000; Derleth и соавт., 2001*

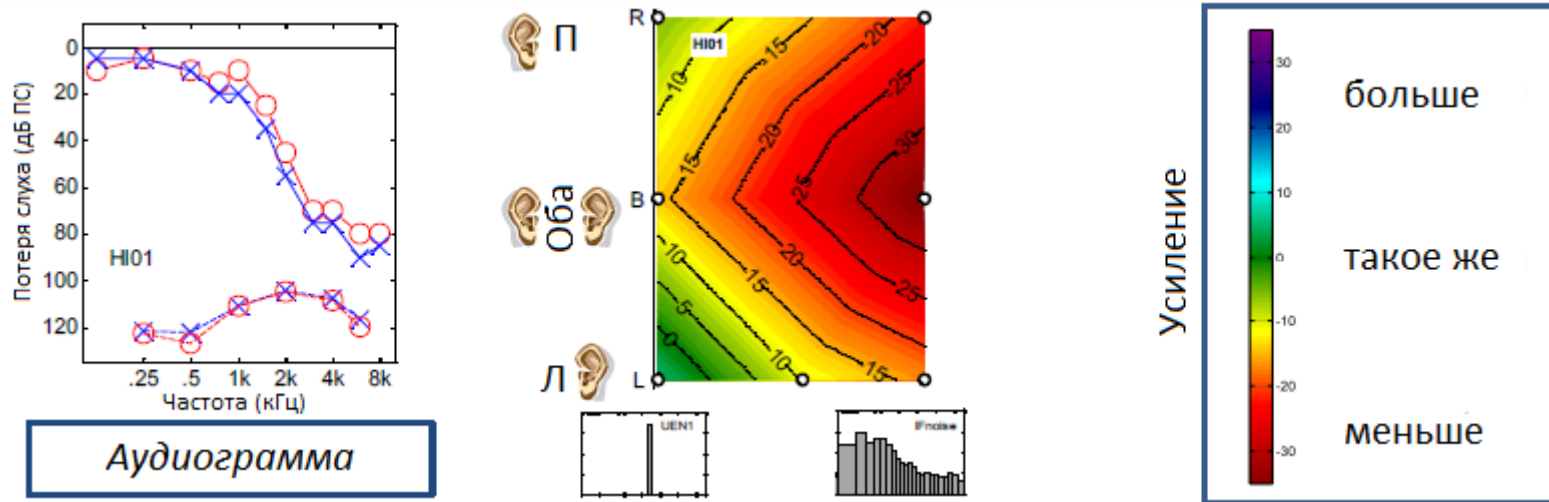
# Перцептивные факторы и стратегии, применяемые в слуховых аппаратах

Фактор	Перцептивные последствия	Реабилитационная стратегия	Технические проблемы
Компонент аттенюации 	Утрата чувствительности, повышение порогового уровня	Улучшение слышимости путем: а) частотно-специфического усиления б) частотной компрессии	Подавление акустической обратной связи Акустические искажения
Компонент искажения 	а) утрата чувствительности; сужение динамического диапазона ("рекруитмент")	а) автоматическая регулировка усиления (APU, AGC), многополосная динамическая компрессия	а) характеристики компрессии, постоянные времени, сопряжение частотных полос
	б) снижение частотной избирательности	б) спектральное выделение	б) устранение артефакта
	в) повышение чувствительности к фоновому шуму	в) шумоподавление (см. также "Нейронный компонент")	в) идентификация / классификация речевого и шумового сигналов
Нейронный компонент  	а) повышение чувствительности к фоновому шуму ("эффект коктейльной вечеринки")	а) моноауральное шумоподавление	а) устранение ошибки оценки и артефакта
	б) нарушение бинауральных функций	б) направленные микрофоны	б) нижняя граничная частота
		в) узколучевая направленность	в) характеристики луча
		д) бинауральное шумоподавление	д) устранение ошибки оценки и передача сигнала между ушами

Следующая проблема: Феномен  
рекрутмента – за слишком тихим  
звуком сразу же идет слишком громкий!

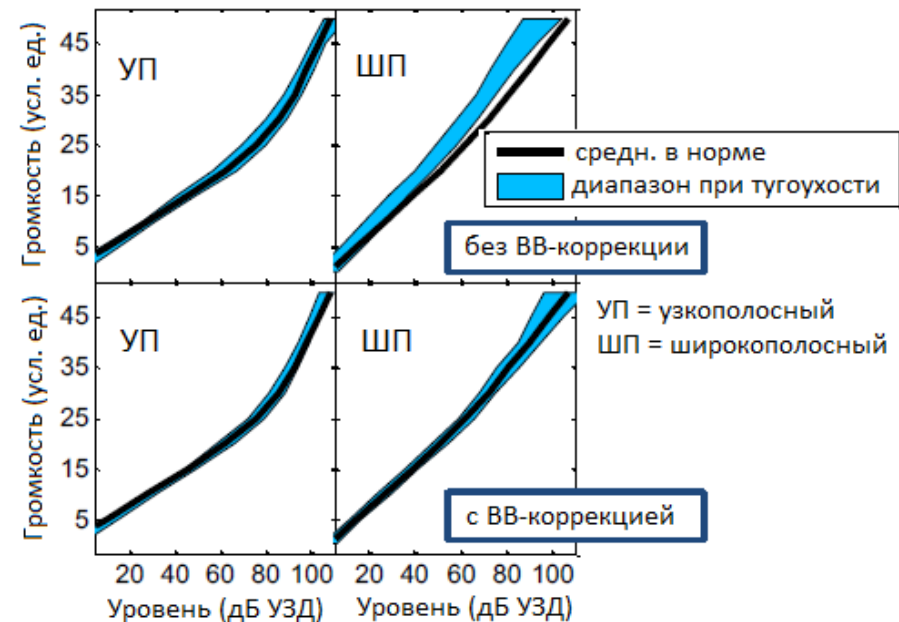
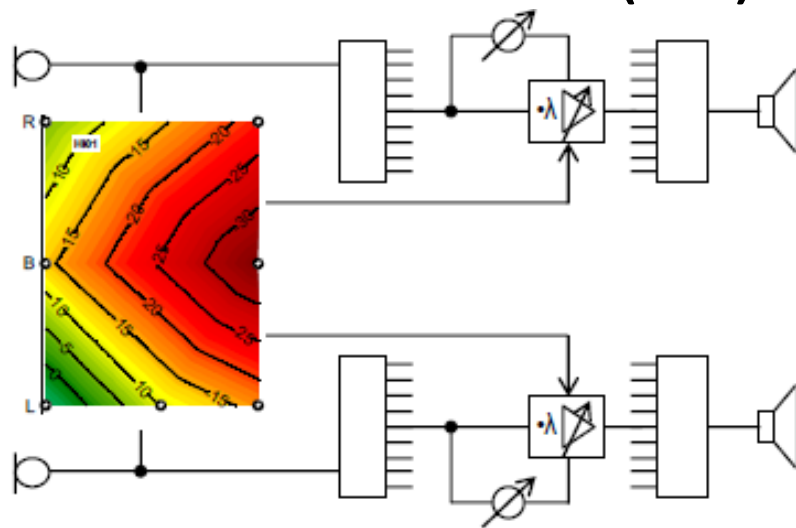


# Бинауральная суммация громкости в слуховых аппаратах



- Исходные настройки: усиление, необходимое для компенсации громкости узкополосных сигналов
- Меньшее усиление для компенсации громкости бинауральных широкополосных сигналов
- Однако необходимо учесть индивидуальные особенности:
  - Иногда широкополосные сигналы требуют такого же усиления
  - Иногда широкополосные сигналы требуют значительно меньшего усиления

# Алгоритм компрессии для коррекции усиления бинауральных широкополосных (ВВ) сигналов



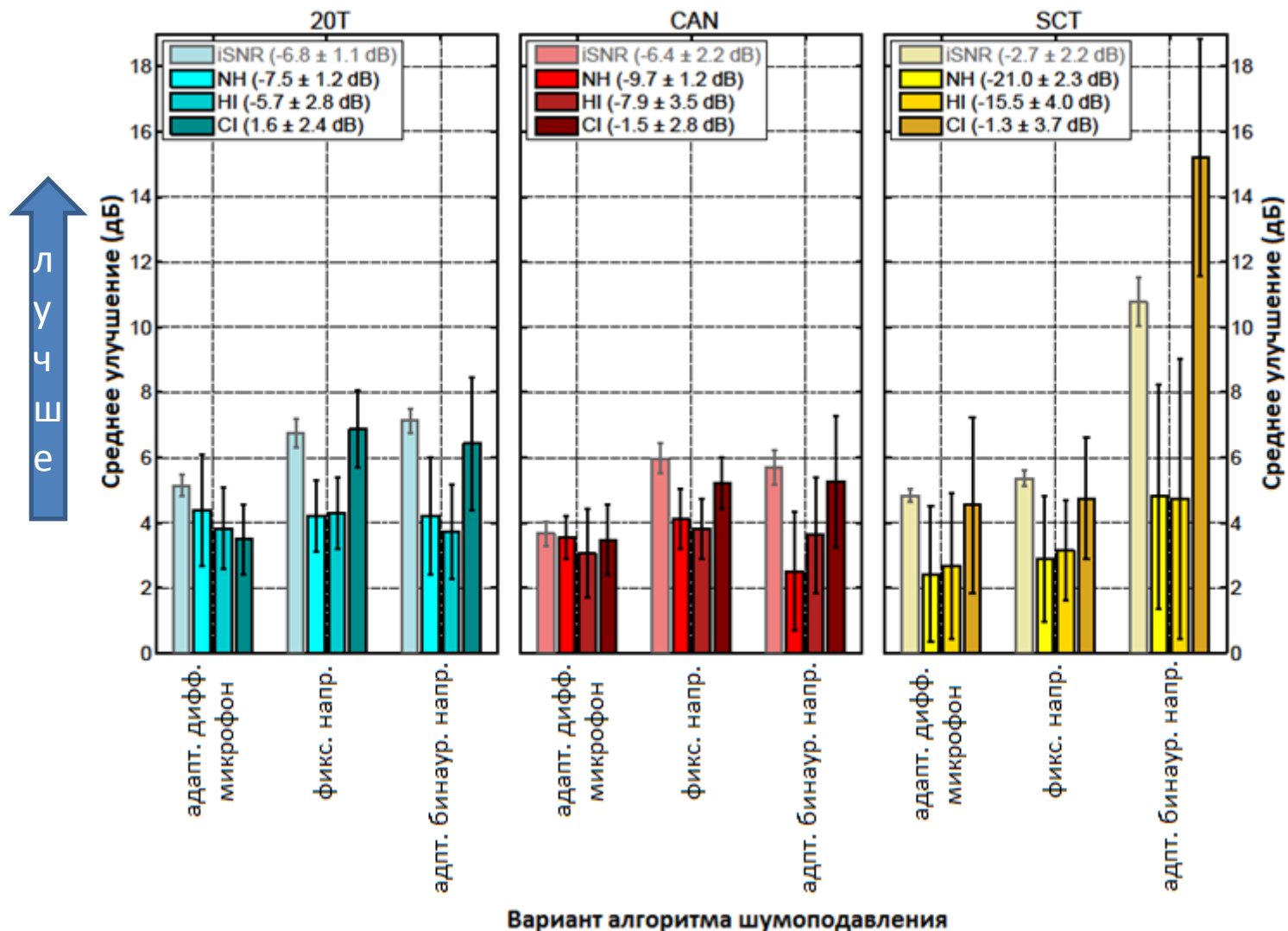
- Алгоритм динамической компрессии с дополнительной таблицей широкополосного усиления
  - Узкополосное усиление скорректировано по широкополосным различиям
  - Восстановлена нормальная громкость УП- и ШП-сигналов

# Стандарт бинаурального шумоподавления\* для слуховых аппаратов и КИ

- Использование нескольких алгоритмов шумоподавления на одном и том же экспериментальном устройстве (МНА – Master Hearing Aid, т.е. компьютерная платформа, на которой можно имитировать любые параметры работы слухового аппарата) с КИ-интерфейсом
- Помещение с выраженной реверберацией
  - $T_{60} = 1250$  мс
- Речевой материал: Ольденбургский фразовый тест (OLSA)
- 3 варианта шума:
  - Смесь голосов 20 дикторов (20Т)
  - Шум кафетерия (CAN)
  - Единственная речевая помеха (SCT)
- Сравнение с нормальнослышащими людьми и объективными показателями

\*Здесь и далее: авторы считают направленность вариантом алгоритма шумоподавления

Показатели, полученные при бинауральном шумоподавлении:  
прогнозируемые, у нормальнослышащих, у пользователей СА и КИ



iSNR = прогнозируемое ОСШ; NH = норм. слух; HI = СА; CI = КИ

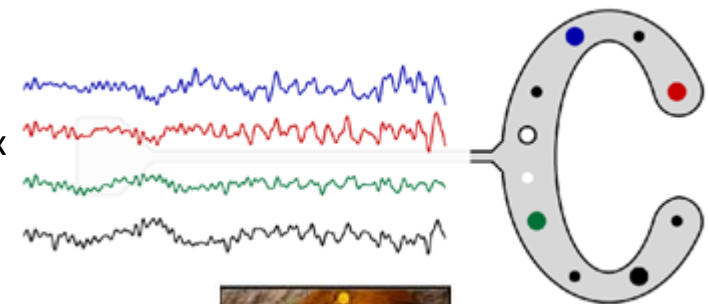
Christoph Völker u соавт., 2015; Baumgärtel u соавт., 2015 (Trends inHearing, в печати)

# Бинауральная обработка сигнала: промежуточные выводы

- Использование бинауральных алгоритмов, замещающих бинауральную обработку, в лабораторных условиях дало положительные результаты во всех группах испытуемых
  - при всех типах шума фиксированная направленность оказалась одним из оптимальных алгоритмов
- Прогнозируемые преимущества (относительно ОСШ) переоценивают результаты у нормальнослышащих и пользователей СА, но реалистичны у пользователей КИ (при максимальном ОСШ!)
- Сохранение бинауральных "подсказок" несколько затратно, но обеспечивает естественность и надежность
- Остаются нерешенные проблемы (управление лучом направленности, ощущение "запертости", реверберация, много одновременно говорящих людей,.....)

# Выводы и клиническое значение

- Необходимы (истинно) бинауральные коррекционные устройства ...
  - для поддержки в "сложной" обстановке (много источников, реверберация)
  - для расширения показаний к использованию устройств (начальные проявления / пользователи СА / пользователи КИ)
- При определении показаний и выборе способа коррекции необходимо учитывать...
  - Результаты многоязычного теста с матричными фразами для оценки сохранившихся бинауральных возможностей (ILD, BILD)
  - Индивидуальные особенности эффекта бинауральной суммации громкости широкополосных сигналов
- Будущие направления
  - Эффективные схемы бинауральной компенсации в разрабатываемых слуховых аппаратах
  - Комбинированные устройства: бытовая электроника + слуховые аппараты
  - Инновационные способы управления настройками: жестами или мозговой активностью!



*Debener и соавт., 2015*

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ, НЕ  
ВОШЕДШИЕ В ДОКЛАД**

# Бинауральный эффект: Виртуальное "увеличение" головы

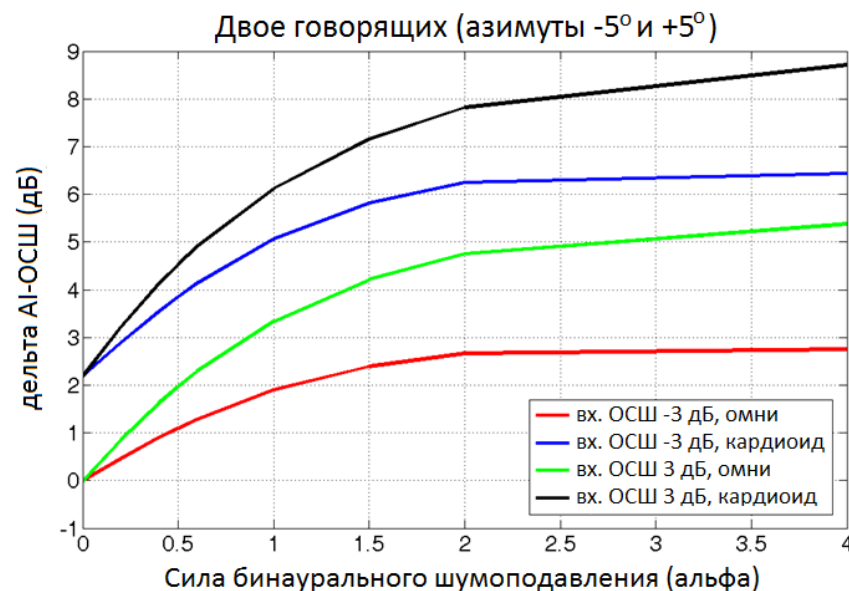
$$\tilde{Y}_L(\omega) = Y_L(\omega) \frac{Y_L^\alpha(\omega)}{Y_R^\alpha(\omega)}$$

$$\tilde{Y}_R(\omega) = Y_R(\omega) \frac{Y_R^\alpha(\omega)}{Y_L^\alpha(\omega)}$$

(Durlach & Pang, 1986, Kollmeier & Peissig, 1990)

Параметр  $\alpha$  должен дать значительный эффект:

- AI-взвешенный расчет ОСШ на выходе
- +3 дБ и -3 дБ ОСШ на входе

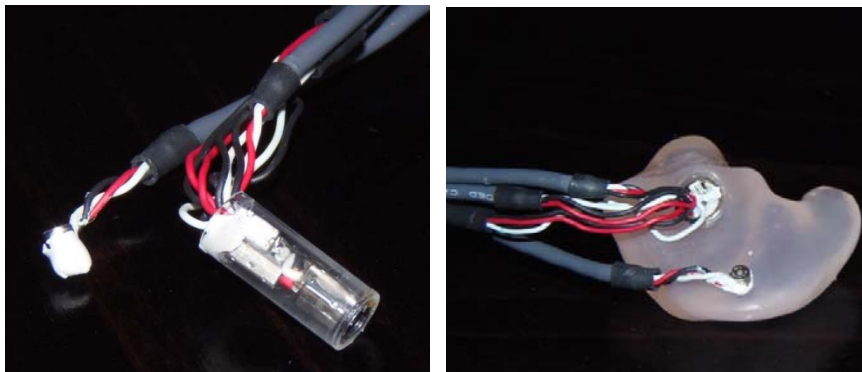


# Основные достижения Hearing4All

- Матричный тест на 16 языках, Supplement of Int. J. Audiol.
- Общие аудиологические функциональные параметры (CAFPA)
- Общая исследовательская платформа для слуховых аппаратов и кохлеарных имплантов (ABCIT/ModHG/Binaural Taskforce)
- Эффект бинауральной суммации громкости для настройки слуховых аппаратов
- Прогнозирование, основанное на автоматическом распознавании речи (FADE)
- Настраиваемый экспериментальный бинауральный слуховой аппарат
- Система TASCAR и комната акустической виртуальной реальности

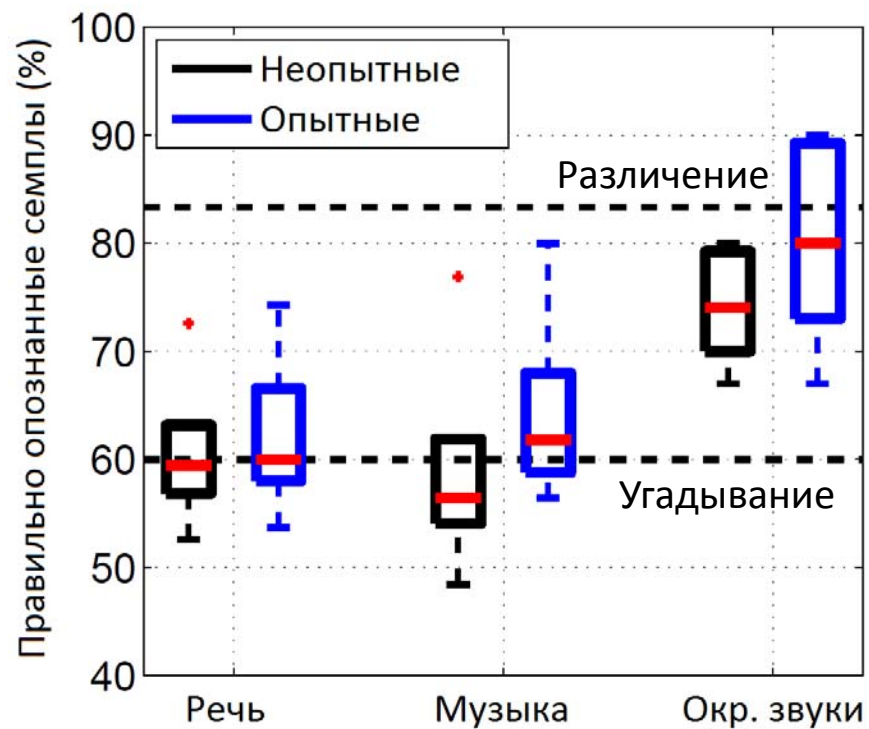
# Акустически "прозрачные" телефоны

- Каждый из них содержит 2 микрофона и 2 ресивера (упакованные в трубочку размером 5x13 мм) + вент
- Интегрированы в индивидуальные силиконовые вкладыши, снабженные третьим (внешним) микрофоном
- Передаточная функция соответствует открытому уху данного индивидуума (реализуется посредством Master Hearing Aid)



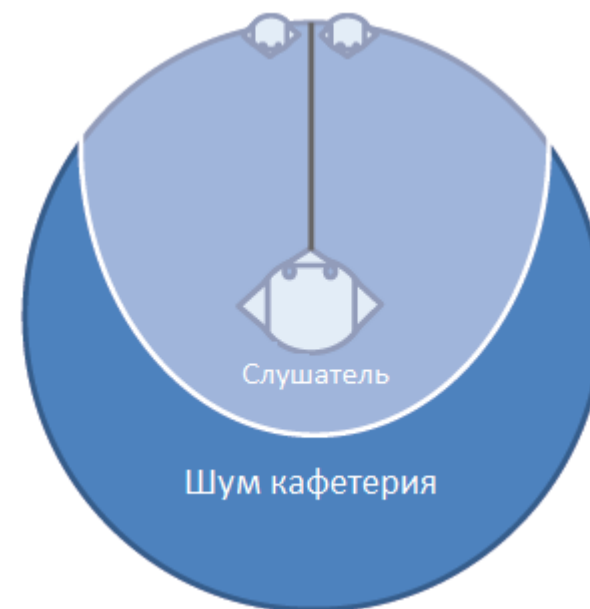
# Акустически прозрачные телефоны: оценка

- Изучение ощущаемой акустической прозрачности
  - 5 нормальнослышающих опытных слушателей и 5 неопытных слушателей
  - Тест АВХ для изучения способности различить...
    - ...активный вкладыш и...
    - ...имитацию открытого слухового прохода (воспроизведение аудиозаписи с целевой амплитудно-частотной характеристикой у барабанной перепонки)
  - Способность различить эти два акустических варианта лишь маргинально превышает уровень случайного угадывания
  - Шум микрофона "активного вкладыша" может приводить к нежелательным эффектам



→ Многообещающая концепция формирования целевой амплитудно-частотной характеристики телефона для достижения "акустической прозрачности"

# Бинауральные решения проблемы "коктейльной вечеринки": выбор сочетания алгоритмов



# Бинауральные решения проблемы "коктейльной вечеринки": выбор сочетания алгоритмов

1

- Монауральная направленность с **кардиоидной характеристикой**

2

- **Бинауральный** согласованный фильтр для подавления некогерентного шума и реверберации

3



# Бинауральные решения проблемы "коктейльной вечеринки": выбор сочетания алгоритмов

1

- Монауральная направленность с **кардиоидной характеристикой**

2

- **Бинауральный** согласованный фильтр для подавления некогерентного шума и реверберации

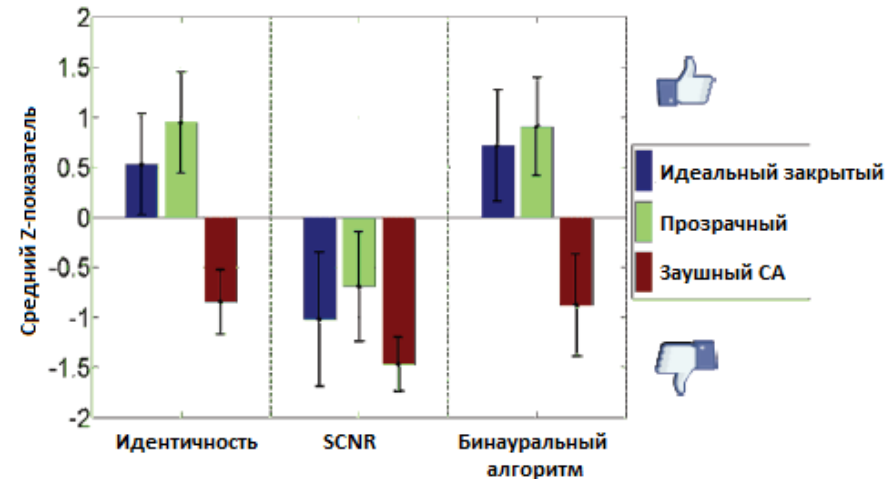
3

- **Бинауральная** обработка сигнала (IPD/ILD) для компенсации утраты бинаурального взаимодействия



# Акустически прозрачные телефоны: оценка с помощью бинауральных алгоритмов

- Качественная оценка с использованием одноканального шумоподавления (SCNR) и бинаурального алгоритма
- Явное предпочтение сочетания бинаурального алгоритма с акустически прозрачным телефоном



→ Многообещающая концепция формирования амплитудно-частотной характеристики телефона для обеспечения его "акустической прозрачности" как предпосылка для бинауральной обработки

*Denk, Hiipakka, Kollmeier, Ernst, BSA meeting, 2014*

# Обоснование концепции "прозрачных" телефонов

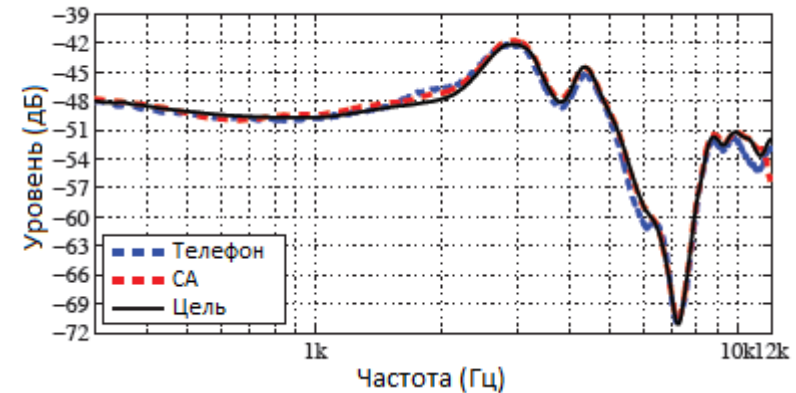
- [Целевая амплитудно-частотная характеристика у барабанной перепонки при помещенном в ухо телефоне] = [амплитудно-частотная характеристика без телефона] + [усиление слухового аппарата]
- Верификация посредством микрофона, помещенного в слуховой проход:
  - В качестве источника звука используются наушники в изолирующих амбушюрах; телефон находится в ухе
  - С помощью СА-мастера создается целевая амплитудно-частотная характеристика
  - Сравнение с пассивным вариантом + компенсация моделированного изменения передаточной функции наружного уха, связанного с наличием в нем телефона
  - Точная настройка для компенсации отклонений от модели

$$P_E = P_S \times \frac{Z_{ECE}}{Z_{ECE} + Z_{RAD}}$$

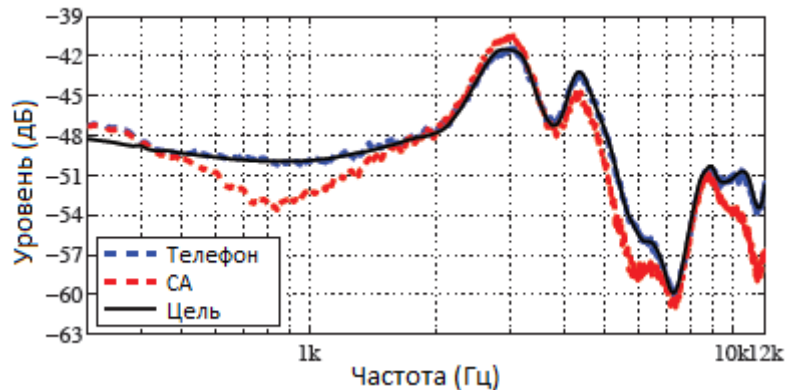
# Результаты, полученные с помощью микрофона

- Внутриушные амплитудно-частотные характеристики, полученные у испытуемых
  - Почти идентичные амплитудно-частотные характеристики в точке размещения микрофона
- В отсутствие эффектов ближнего поля давление у барабанной перепонки также одинаковое

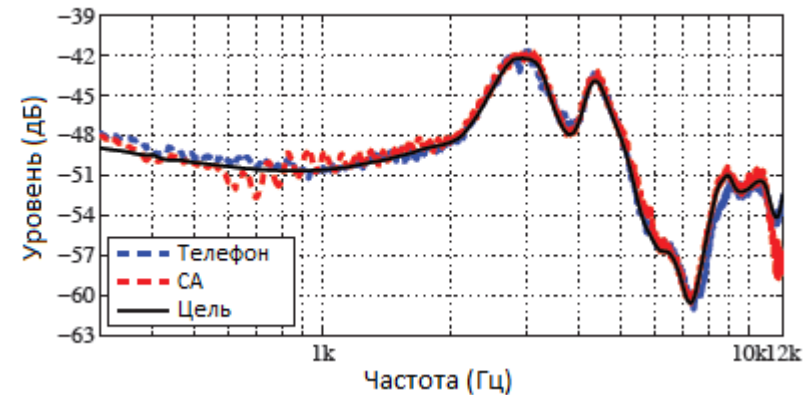
После адаптивной фильтрации в сценарии "только выход":



После начальной фильтрации в сценарии слухового аппарата:



После адаптивной фильтрации в сценарии слухового аппарата:



# Динамика развития исследований слуха в Ольденбурге

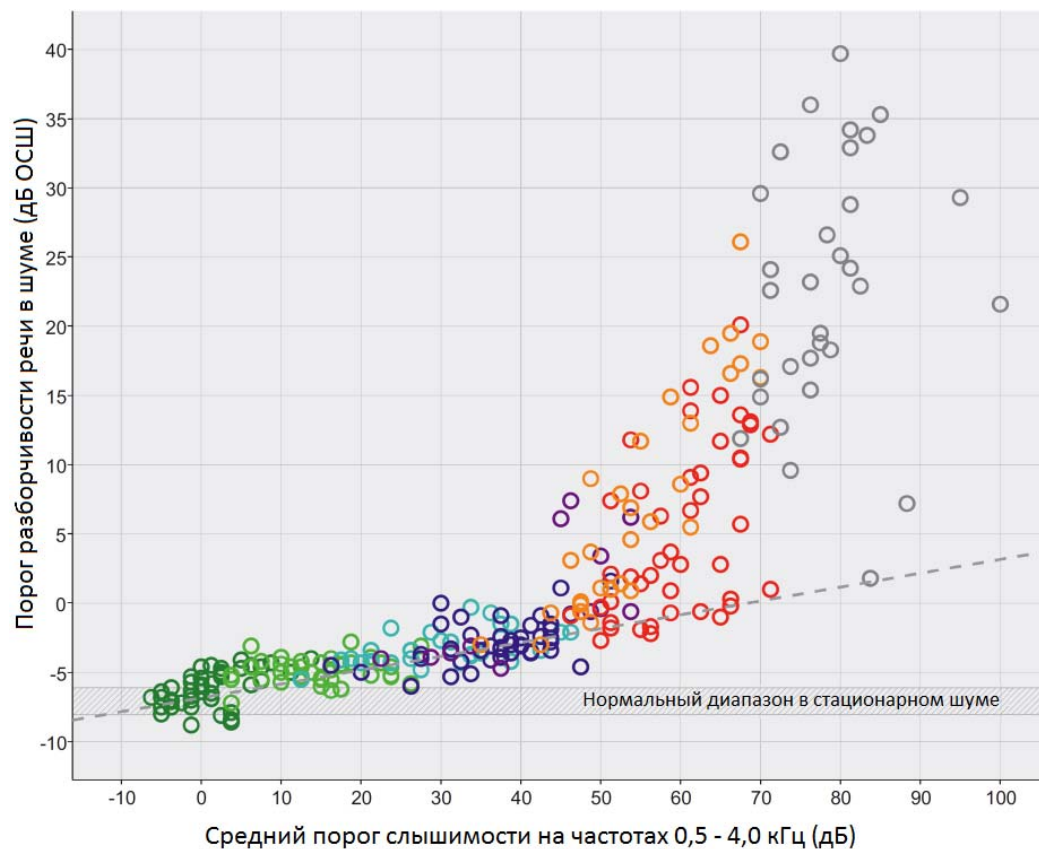


Дочерние учреждения:



80% слуховых аппаратов в мире используют "Ольденбургские технологии"

# Нарушение восприятия речи в стационарном шуме (65 дБ ПС) при тугоухости



- Немецкий матричный тест (OLSA)  
N = 158 (Wardenga и соавт., 2012)
  - Общее повышение порога разборчивости речи по мере повышения степени тугоухости
  - Большой разброс индивидуальных данных!

Тип аудиограммы:

- Нормальный слух
- Высокочастотная тугоухость
- Высокочастотная крутонисходящая
- Высокочастотная наклонная
- Низкочастотная тугоухость
- Тугоухость средней степени с наклоном
- Ровная тугоухость средней степени
- Тугоухость высокой степени

# Остающиеся проблемы

- Зависимость от входного ОСШ
    - Шумоподавление оптимально при ОСШ  $> 0$  дБ, что больше отвечает потребностям пользователей КИ, чем нормальнослышащих
    - Остаточная индивидуальная бинауральная обработка активна только для ОСШ  $< 0$  дБ (?)
    - Тесты пороговой разборчивости речи нацелены на  $< 0$  дБ
    - Активация различных алгоритмов зависит от входного ОСШ
  - Зависимость от сложности акустической обстановки
    - Алгоритмы шумоподавления подразумевают определенную модель смешения звуков и не работают при отклонении от этой модели (больше число источников, больше реверберации, движения головой)
    - Бинауральные алгоритмы могут отрицательно сказаться на локализационной информации, но сохраняют данные, основанные на декомпозиции акустической обстановки
    - Изменяется активация различных входных алгоритмов и/или параметров, связанных с акустической ситуацией
- Желательно точно знать текущую акустическую ситуацию и ее взаимодействие с человеческим восприятием!

Самая частая жалоба ~18% населения – как ее исследовать?

