



От классической психоакустики к психоакустике речи.

Памяти профессора Людмилы Андреевны Чистович

Люблинская В.В., кандидат биологических наук

Огородникова Е.А., кандидат биологических наук

Работа посвящена памяти выдающегося учёного в области исследования речи — профессора Людмилы Андреевны Чистович. С 1961 по 1985 гг. она возглавляла научный коллектив в Институте физиологии им. И.П. Павлова РАН (до 1981г. — совместно с Валерием Александровичем Кожевниковым, её мужем и соратником). Пионерские работы коллектива, направленные на изучение слухового восприятия речи, получили мировое признание как «Ленинградская школа».

В докладе представлен краткий обзор научной деятельности коллектива от классической психоакустики до психоакустики речевых сигналов, выделены основные достижения экспериментальных работ, выполненных под руководством Л.А. Чистович и ведущих сотрудников. Более подробно авторами рассмотрены новые для того времени гипотезы о механизмах слухового анализа речи, а также конкретные реализации моделей, отражающих периферический и центральный уровни обработки речевого сигнала в слуховой системе человека. Обсуждается фундаментальная роль исторических данных в работах зарубежных коллег, продолжение научных традиций Людмилы Андреевны Чистович в современных экспериментальных и прикладных работах группы её коллег, продолжающих изучение восприятия речи в настоящее время.

Введение

Профессор Людмила Андреевна Чистович (1924–2006) была выдающимся учёным, внёсшим большой вклад в дело изучения речи человека. Вместе со своим мужем и соратником Валерием Александровичем Кожевниковым (1924–1981) она стала основателем нового научного направления по изучению закономерностей слуховой обработки речевых сигналов. Её имя приобрело и сохраняет до настоящего времени широкую известность как у нас в стране, так и за рубежом.

Две лаборатории — физиологии речи (руководитель Л.А. Чистович) и биофизики речи (руководитель В.А. Кожевников) — были созданы в Институте физиологии им. И.П. Павлова РАН в начале 1960 г. как один из отделов Центра космической физиологии и биологии. Оба коллектива работали в тесном взаимодействии до преждевременной смерти в 1981 г. В.А. Кожевникова, когда в данной области исследований осталась только лаборатория физиологии речи, возглавляемая Л.А. Чистович до 1986 г.

Начало 60-х годов характеризуется развитием в нашей стране космической техники и созданием связанной с ней новой научно-технической отрасли, ориентированной на разработку систем автоматического распознавания и синтеза речи. Это сопровождалось внедрением кибернетики во многие сферы науки и технологии. Задачи молодого коллектива по исследованию речи человека в большой мере определялись задачами речевых технологий на начальном этапе их становления. Неудивительно, что подход к решению проблемы исследования речи был в основе технократическим, использующим метафоры из теории информационных систем. Новым в этой идеологии была направленность на разработку моделей слухового восприятия речи человеком, основанных на результатах экспериментальных психоакустических исследований, фонетических знаниях, данных физиологии, представлений об обработке сигналов в системах связи и методах математического моделирования. В настоящее время такой междисциплинарный подход представляется обычным, но в 1960-е–70-е годы прошлого столетия он открывал новый путь в науке о речи.

Основные методы на начальном этапе работы коллектива были заимствованы из известных психоакустических исследований. Ранние экспериментальные работы Л.А. Чистович и её докторская диссертация посвящены исследованию временных характеристик слуха, основанному на использовании методов классической психоакустики (обнаружение, различение, маскировка тональных и шумовых стимулов) [1]. Сама Л.А. Чистович обладала широкими профессиональными познаниями в этой области. Её работы о частотных кривых маскировки [2] и о влиянии длительности тональных посылок на пороги различения частоты [3] признаны классическими и значимы до сих пор. Но одни методы классической психоакустики применительно к исследованию слухового восприятия речевых сигналов оказываются недостаточно информативными. В основе классической психоакустики лежит представление о слухе как о коммуникационном канале, для изучения которого достаточно использовать в качестве стимулов чистые тоны или шумы. Речевые сигналы имеют принципиально иную акустическую структуру, определяющую необходимость поиска новых экспериментальных подходов и методов исследования [4].

В основе исследований в лабораториях Л.А. Чистович и В.А. Кожевникова была идея о том, что слуховая система и мозг человека представляют собой высокоорганизованную автоматическую систему, которая выполняет измерительные и логические операции в процессе речевого поведения. В этом случае задачи исследования должны рассматриваться как выяснение таких операций и их функциональное моделирование. «Мы полагаем в нашей группе, что единственный путь для описания речи человека состоит не в описании восприятия самого по себе, но в понимании смоделированной системы, которая наиболее соответствует экспериментальным данным, полученным при исследовании восприятия речи» [5].

Изучение слухового восприятия в лабораториях проводилось по двум направлениям. Одно из них было посвящено функциональному моделированию — имитации преобразований речевых сигналов на периферии слуховой системы (периферический слуховой анализатор спектра), а также некоторых процессов на более высоком уровне слухового анализа — при слуховой обработке амплитудной огибающей. Другое направление касалось экспериментального изучения закономерностей и механизмов обработки периферических откликов речевых сигналов центральными отделами слуховой системы с использованием психофизических методов исследования. Следует отметить, что проблема центральной обработки речевых сигналов до настоящего времени остаётся актуальной и сохраняет для специалистов в данной области статус одного из важнейших направлений. Реализация и применение функциональных моделей выступают здесь необходимым инструментом, а в те годы в полной мере относились к разряду инновационных разработок.

Моделирование периферии и центрального уровня слухового анализа

Первая версия периферического слухового анализатора была выполнена как аналоговая линейная модель, включающая имитацию частотных кривых на уровне откликов слухового нерва, эффекта двухтонового подавления и кратковременной адаптации (условное название «Улитка») [6]. Позднее модель с теми же параметрами была реализована на компьютере в программном виде [7].

В конце 70-х годов группа коллег под руководством В.А. Кожевникова разработала ещё одну модель — обработки амплитудной огибающей в частотных каналах слухового спектрального анализатора, известную как модель Обнаружения Амплитудных Неравномерностей (ОАН) [8]. Выходы 128 частотных каналов анализатора служили входом модели ОАН, основу которой составлял набор трёх типов полосовых фильтров с центральными частотами 7, 25 и 75 Гц. При пересечении выходными огибающими фильтров некоторого положительного порога (для фильтра 25 Гц) формировались положительные метки «on-маркеры», пересечение отрицательного порога сопровождалось появлением «off-маркеров». Последовательность таких ответов обозначала интервалы, выделяемые для проведения измерения их длительностей и дальнейшей обработки сигнала [9].

Психоакустические исследования слуховой обработки речевых сигналов

Комплекс исследований откликов модели спектрального слухового анализатора на речевые сигналы показал, что «слуховые динамические спектрограммы» отражают поток определённых событий и особенностей, характеризующих речевые сигналы. Была выдвинута рабочая гипотеза о том, что в центральных отделах слуховой системы осуществляется обнаружение и анализ этих событий. Предполагалось, что эту функцию выполняет система параллельно работающих детекторов, одна часть которых реагирует только на быстрые изменения амплитуды и частоты спектральных компонент, другая — выполняет анализ свойств более продолжительных во времени сегментов. В известном приближении, результаты такой обработки можно рассматривать как проявления фазических и тонических реакций нейронов, наблюдаемые в нейрофизиологических исследованиях на всех отделах слухового пути [10].

Большая серия психоакустических экспериментов была посвящена изучению слуховой обработки спектральной огибающей речеподобных звуков (гласных) и организации их фонемной интерпретации. В результате были установлены новые данные о восприятии формант и формантных переходов, принципах категоризации гласных, феномене спектрального центра тяжести и его механизмах, а также о закономерностях накопления информации о спектральной огибающей при распознавании гласных. Результаты этих работ до 1976 г. были опубликованы в монографии [11]. Работа [12] содержит обзор более поздних данных, в основном, о слуховой обработке спектральных свойств речевых сигналов.

Основной проблемой, которая выделялась в работах лабораторий Людмилы Андреевны и Валерия Александровича на протяжении почти всего периода, была проблема динамики речи [11, 12, 13]. Этот факт особо подчеркнут в недавно опубликованных материалах международной конференции по теме «Динамика речи и слуха», посвящённой памяти Л.А. Чистович [14].

Необходимо отметить также значительное влияние пионерских идей «Ленинградской школы» [14] на исследовательские проекты, выполняемые зарубежными специалистами. В качестве примеров такого влияния выступают следующие работы. Гипотеза о принципе последовательно-параллельного программирования артикуляторного процесса [15] была проверена экспериментально и развита в работе [16]. Метод быстрого повторения (быстрая имитация) речевых звуков, разработанный Л.А. Чистович в 60-х годах [17], был использован Марслен-Вильсоном (по его собственному признанию) при разработке «теории когорт» [18]. Гипотеза о принципе слуховой обработки как параллельного детектирования акустических событий стимулировала нейрофизиологические исследования в [19], а также попытки моделирования этого процесса [20]. Работы [21, 22] представляют примеры изучения роли, выполняемой феноменом кратковременной периферической адаптации в восприятии речи, который исследовался Чистович психоакустическими методами в начале 70-х годов [23]. Заметный отклик среди зарубежных специалистов вызвали результаты работ по исследованию эффекта спектрального центра тяжести, уступающие частотную область (примерно 3.5 Барк) его проявления [11, 24, 25, 26]. Эта тема была развита в дальнейшем в серии работ, изучающих проявление эффекта центра тяжести в динамике [27, 28].

После ухода Людмилы Андреевны из Института физиологии её коллеги по лаборатории в течение ряда лет продолжали экспериментальные исследования в прежнем направлении. Одним из примеров этому может служить работа [29]. В последние годы научная работа коллектива приобрела более прикладную направленность, связанную с исследованиями особенностей восприятия речи детьми со слуховыми и речевыми нарушениями [30, 31]. Однако сотрудники лаборатории сохраняют традиционный подход и стиль работы, выработанные Л.А. Чистович и В.А. Кожевниковым. Это находит отражение и в идеологии современных исследований слухоречевого восприятия у глухих людей после операции кохлеарной имплантации (электродное протезирование слуха), и в разработке системы направленного тренинга для их реабилитации, проводимой совместно со специалистами Научно-исследовательского института уха, горла, носа и речи МЗСР РФ в Санкт-Петербурге [32].

Литература

1. Чистович Л.А. Временные характеристики слуха // Автореферат диссертации доктора биол. наук. Ин-т физиологии им. Павлова АН СССР. 1958.
2. Чистович Л.А. Частотные характеристики эффекта маскировки // Биофизика. 1957. Т. 2. № 6. С. 743–755.

3. Лян Чжи-ань и Чистович Л.А. Дифференциальные пороги по частоте в зависимости от длительности тональных посылок // Акустический журнал СССР. 1960. Т. 6. № 1. С. 81–86.
4. Чистович Л.А. Психоакустика и вопросы теории восприятия речи // Распознавание слуховых образов. Новосибирск: Наука, 1970. С. 55–141.
5. *Chistovich, L. A.* Auditory processing of speech. // *Language and Speech*. 1980. P. 23. P. 67–73.
6. Бороздин А.Н., Кожевников В.А., Головешкин В.Т., Шупляков В.С. Особенности изображения речевых сигналов моделью спектрального слухового анализа // Физиологический журнал СССР. 1980. Т. 66. № 1. С. 125–131.
7. Венцов А.В., Зотова Е.Н., Столярова Э.И. Программный комплекс для исследования речевых сигналов // Тез. докл. Всесоюзного семинара АРСО-15. Таллин, 1989. С. 188–189.
8. Кожевников В.А., Столярова Э.И. Особенности реакций на речевые сигналы модели слухового выделения амплитудных неравномерностей // Физиологический журнал СССР, 1980. Т. 66, № 1, С. 132–138.
9. *Stoliarova E.I.* The functional model of auditory segmentation // *Proceedings of the XIIIth ICPHS. Eix-en-Provence*, 1991, V. 3. P. 398–401.
10. Кожевников В.А., Чистович Л.А. О природе слуховых признаков речевого сигнала // Акустический журнал. 1978. Т. 24. № 1. С. 152–153.
11. Чистович Л.А., Венцов А.В., Гранстрем М.П., Жуков С.Я., Жукова М.Г., Карницкая Э.Г., Лисенко Д.М., Люблинская В.В., Мушников В.Н., Слепокурова Н.А., Федорова Н.А., Хаавель Р.Х., Чистович И.А., Шупляков В.С. Физиология речи. Восприятие речи человеком. Руководство по физиологии. Л.: Наука. 1976. 388 с.
12. *Chistovich, L.A.* Central auditory processing of peripheral vowel spectra // *J. Acoust. Soc. Am.* 1985. V. 77. P. 789–805.
13. *Chistovich, L. A., Lubliskaya V. V., Malinnikova T.G., Ogorodnikova E.A., Stoljarova E.I., Zhukov SJa.* Temporal processing of peripheral auditory patterns of speech. // *The Representation of Speech in the Peripheral Auditory system.* / Eds: R. Carlson and B. Grandsrom. Amsterdam: Elsevier Biomedical Press, 1982. P. 165–180.
14. Divenyi, P., Greenberg, S., Meyer, G. (Eds). *Dynamics of Speech Production and Perception*. 2006. IOS Press. 369 p.
15. *Chistovich, L.A., Кожевников В.А., Алякринский В.В., Бондарко Л.В., Голузина А.Г., Клаас Ю.А., Кузьмин Ю.И., Лисенко Д.М., Люблинская В.В., Федорова Н.А., Шупляков В.С., Шуплякова Р.М.* Речь. Артикуляция и восприятие. М.-Л.: Наука, 1965. 241 с.
16. *Ohala, J.J.* The temporal regulation of speech / *Auditory Analysis and Perception of Speech*. G. Fant and M.A.A. Tatham, (Eds.), 1975. Academic Press. P. 431–464.
17. Чистович Л.А., Клаас Ю.А., Кузьмин Ю.И. Текущее распознавание звука речи. (Опыты с быстрым повторением и буквенной записью согласных) // Вопросы психологии. 1962. Т. 6. С. 26–39.
18. *Marslen-Wilson, W.D.* Speech shadowing and speech comprehension. // *Speech Communication*, 1985. V. 4. P. 55–74.
19. *Delgutte, B., Hammond, B.M., Kalluri, S K, Litvak, L.M., and Cariani, P.A.* Neural encoding of temporal envelope and temporal interactions in speech. // *Proc. ESCA Workshop the Auditory Basis of Speech Perception*, Keele University, UK, 1996. supplement.

20. Schwartz, J.L., Beutemps, D., Arrouas, Y., and Escudier, P. Auditory analysis of speech gestures. // *The Auditory Processing of Speech*. M. E. H. Schouten, ed. Mouton de Gruyter, Berlin, New York. 1992. P. 239–252.
21. Lacerda F. Effects of peripheral auditory adaptation on the discrimination of speech sounds. // *PERILUS VI*, 1987. P. 1–94.
22. Repp, B.H. On the possible role of auditory short-term adaptation in perception of the prevocalic m-n contrast. // *J. Acoust. Soc. Am.* 1987. V. 82. P. 1525–1538.
23. Chistovich, L.A. Auditory processing of speech stimuli — evidences from psychoacoustics and neurophysiology. // *Proceed. of the Seventh Intern. Congress on Acoustics*. Budapest. 1971. V. 1. P. 27–42.
24. Chistovich L.A., Lublinskaja V. V. .The 'Center of gravity' effect in vowel spectra and critical distance between the formants: psychoacoustical study of the perception of vowel-like stimuli. // *Hearing Research*. 1979. V. 1. P. 185–195.
25. Chistovich L.A., Sheikin R.L., Lublinskaya V.V. 'Centres of gravity' and spectral peaks as the determinants of vowel quality. // *Frontiers of Speech Communication Research*. / Eds: B. Lindblom and S. Ohman. London, N.Y., San Francisco, 1979. P. 143–157.
26. Xu Q, Jacewicz E., Feth L.L., Krishnamurthy A.K. Bandwidth of spectral resolution for two-formant synthetic vowels and two-tone complex signals. // *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004. V. 115. P. 1653–1664.
27. Lublinskaja, V.V. The "center of gravity" effect in dynamics. // *Proc. ESCA Workshop on the Auditory Basis of Speech Perception*, Eds: W. Ainsworth and S. Greenberg, Keele University, UK. 1996. P. 102–105.
28. Feth, L.L., Fox, R A., Jacewicz, E., and Lyer, N. Dynamic center-of-gravity effects in consonant-vowel transitions. // *Dynamics Of Speech Production And Perception*. Eds: P. Divenyi and G. Meyer. Amsterdam, NATO ASI Series, IOP Press. 2006. P. 103–111.
29. Lublinskaya V.V, Ross J., Ogorodnikova E.A. The auditory perception and processing of amplitude modulation in speech-like signals: Legacy of the Chistovich-Kozhevnikov group. // *Dynamics of Speech Production and Perception*. Eds: P. Divenyi and G. Meyer. Amsterdam, NATO ASI Series, IOP Press. 2006. P.87–103.
30. Lublinskaja V.V., Koroleva I.V., Kornev A.N., and Lagunova E.V. Perception of noised words by normal children and children with speech and language impairments. // *Proc. 5th European Conference on Speech Communication and Technology (EuroSpeech '97)*, 1997. V. 5. P. 2491–2494.
31. Люблинская В.В., Королева И.В., Огородникова Е.А., Пак С.П., Столярова Э.И. Восприятие высоты голоса и мелодики речевых сигналов глухими людьми с кохлеарными имплантами. // *Рос. оторинолар.*, 2007, № 4. С. 3–13.
32. Ogorodnikova E.A., Koroleva I.V., Lublinskaja V.V., Pak S.P., Stoljarova E.I., Baljakova A.A. Computer in rehabilitation of patients with cochlear implants. // *Proc. of 13-th International Conference «Speech and Computer — SPECOM'2009»*. SPb: SPIIRAS, 2009 (ISBN 978-5-8088-0442-5). P. 483–486.

Сведения об авторах

Люблинская Валентина Владимировна —

кандидат биологических наук. Ведущий научный сотрудник лаборатории психофизиологии речи Института физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург.

Базовое образование — инженер-электроакустик, окончила Ленинградский электротехнический институт в 1959 г.

С 1961 г. работает в Институте физиологии им. И.П. Павлова в лаборатории физиологии речи (в настоящее время — лаборатория психофизиологии речи).

До 1986 г. работала под руководством проф. Л.А. Чистович, с 1986 по 2006 г. руководила сектором исследования речевых сигналов.

Основной научный интерес — закономерности слухового восприятия речевых сигналов человеком. Автор более 150 печатных научных работ на русском и английском языках.

Огородникова Елена Александровна —

кандидат биологических наук. Работает в Институте физиологии им. И.П. Павлова РАН с 1977 г.

С 1977 по 1981 г. работала в лаборатории биофизики речи под руководством В.А. Кожевникова, 1981 по 1986 г. — в лаборатории физиологии речи под руководством Л.А. Чистович. С 2006 г. является руководителем лаборатории психофизиологии речи.

Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН.
Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д.6.
Тел. (812) 328 13-01; факс: (812) 328 05 01.
E-mail: speech.inf@gmail.com