

МРТ-визуализация границы зубов как органов артикуляции

Г. Кедрова, Н. Анисимов, Л. Захаров, О. Николаев
МГУ им. М.В. Ломоносова

MRI of teeth contours in articulation processes

G. Kedrova, N. Anisimov, L. Zaharov, O. Nikolaev
Moscow State Lomonosov University

Abstract

The research is focused on experimental methods and technology for detailed MR-visualization of solid calciferous tissue boundaries (i.e. teeth and adherent bony structures) and estimation of overall resonance shape throughout the speech production process. Vocal tract area evaluation from MRI data requires a special technique for tooth visualization because of the lack of signal from the teeth as objects consisting of solid calciferous tissue. In this paper, a new method is proposed to capture MR-images of this kind of biological objects and accurately superimpose their outlines onto MR-images of sagittal plane of articulatory tract. Upper and lower incisors' MR-images with the surrounding bony structure are obtained by MR-scanning a subject with a contrast medium enveloping teeth's surfaces. As a contrast medium we've used a chewing gum turned out to be an adhesive material with optimal for MRI special properties. The teeth and adherent bony tissue contours were superimposed onto the target MR-images (MR-scanning of Russian vowel articulations) using certain guiding landmarks recommended in the appropriate literature.

Keywords: MRI, tooth visualization, tooth superimposition, vocal tract configuration, vocalic system of the Russian language.

1. Введение

Магнитно-резонансная томография (МРТ) сегодня является общепризнанным методом медицинской диагностики – в первую очередь, из-за высокой информативности и точности получаемых данных, а также (что немаловажно) благодаря безопасности такого исследования для испытуемого. В лингвистической науке уже достаточно рано стали высказываться предположения, что получение и сопоставление данных как рентгенографического, так и томографического исследований артикуляторных органов в процессе производства речи позволит глубже проникнуть в природу этого процесса и лучше понять его основные механизмы и закономерности. Эти исследования являются сегодня единственно доступными методами прямого, непосредственного наблюдения органов речевой артикуляции в действии, в то время как наиболее распространенный и разработанный акустический метод, основанный на анализе аудиограмм, не дает ответа на многие актуальные вопросы артикуляторной теории (в особенности, касающиеся языковой вариативности – аллофонии, интонационной и просодической вариативности, индивидуальной вариативности и т.д.) [1]. В этом контексте представляется весьма целесообразным и продуктивным использование современной томографической техники, в первую очередь, для решения ряда актуальных прикладных задач, в частности: для создания компьютерных моделей артикуляционных процессов и их применения в области речевой дидактики, повышения качества автоматического синтеза речи, совершенствования технологий автоматического анализа речевого сигнала (распознавания речи) и т.п. проблем. Метод магнитно-резонансной томографии позволил преодолеть многие ограничения кинорентгенографического способа исследования речи. Однако последний имеет относительно длительную историю и уже обладает определенным набором общепризнанных методов и методик (это позволило подготовить достаточно представительные и авторитетные базы данных по отдельным речевым артикуляторным комплексам – в частности, звукам рус-

ской речи [2]. В то же время первые попытки использовать МРТ при изучении речевой артикуляции датируются всего лишь концом XX в., а возможности метода, который находится в стадии развития, далеки от исчерпания.

Как и всякий технический способ исследования физических и физиологических процессов, МРТ существенно зависит от уровня развития лежащей в ее основе технологии и соответствующих экспериментальных методик. Для исследований речевой артикуляции как динамического процесса, достаточно быстро развертывающегося во времени, даже на современных томографах с полем 1.5-3 Тесла пока не удается вести съемку в реальном масштабе времени с требуемой скоростью. Поэтому исследования в этой области с использованием низкочастотных (0.5Тесла) томографов требуют особенно тщательной проработки методики и техники проведения эксперимента и поиска новых методов, позволяющих преодолеть технические ограничения МРТ-сканирования. Так, один из оригинальных и достаточно плодотворных подходов к решению проблемы «динамической» высокоскоростной онлайн- (on-line) МРТ-съемки разработан и апробирован нами в серии работ по МРТ-визуализации в реальном времени процесса артикуляции при производстве звуков и слогов русской речи, а также при чтении русскими дикторами-носителями языка специальным образом сконструированных псевдослов [3]. Настоящая работа является продолжением наших исследований, нацеленных на повышение информативности и достоверности МРТ-визуализации артикуляторного тракта человека.

Существенной проблемой, которая во многих случаях становится критической для оценки достоверности и полноты результатов МРТ исследования речевых артикуляций, является проблема визуализации челюстных структур, которые не содержат атомов водорода, в частности, зубов верхней и нижней челюстей, поскольку обычный МР-томограф ориентирован именно на регистрацию сигналов от протонов воды и других водородсодержащих веществ [4]. Поэтому зубы, которые играют существенную роль в формировании звуков речи, практически не визуализируются на обычных МРТ-изображениях, т.е. они не отличимы от воздушной массы в полости рта. К сожалению, приходится признать, что большинство предлагаемых в литературе методов визуализации зубного контура [5] достаточно сложно тиражировать и адаптировать в условиях других МРТ-лабораторий в силу их значительной трудоемкости и технологической сложности (в частности, такие технически затратные решения, как изготовление специальных двухслойных зубных накладок, между слоями которых размещены высококонтрастные вещества типа растительных жиров и т.п.).

Одним из наиболее привлекательных в силу его общедоступности и простоты применения методов может считаться способ МРТ-визуализации твердых тканей, предложенный в 2004 г. японскими исследователями (К. Хонда и его соавторами), суть которого заключается в заполнении ротовой полости веществом, дающим сильный МР-сигнал (в рассматриваемых экспериментах – черничным соком), которое удерживается испытуемым в ротовой полости на протяжении МРТ-съемки. После проведения трехмерного МРТ-сканирования строится объемное изображение границ зубного ряда верхней и нижней челюстей, которое впоследствии накладывается на МРТ-изображения артикуляторного тракта в момент производства речевых звуков. Подобные построения производятся для более точной оценки объема и формы речевых резонаторов [5].

Однако и этот метод, который может быть признан достаточно успешным для исследования динамики изменения объема и формы ротовой полости с учетом размера, местоположения и формы зубов, на наш взгляд, не лишен определенных недостатков. Прежде всего к ним можно отнести дискомфортное положение испытуемого, связанное с необходимостью длительного удержания в полости рта экспериментальной жидкости, не глотая ее, несмотря на положение лежа. Кроме того, этот метод, как показывает проведенный нами эксперимент, недостаточно информативен для визуализации передней поверхности зубов, особенно на МРТ-снимках сагиттального среза ротовой полости (см. рис. 1).



Рис. 1. МРТ-изображение артикуляторного тракта испытуемого (сагиттальный срез) с черничным соком (область белого цвета) в ротовой полости.

Для решения задачи по визуализации зубов мы предпочли способ, который можно назвать методом «снятия слепка», который по своей идее сходен с методикой, используемой при скульптурных работах. Метод реализуется путем наложения на зубы хорошо контактирующего пластичного и однородного материала, дающего сильный сигнал ЯМР. Тогда на МР-изображении границы зубов хорошо визуализируются в виде темных линий на фоне этого сигнала.

Слепочный материал должен обладать определенными свойствами – прежде всего, он не должен быстро растворяться. Кроме того, желательно, чтобы сильный сигнал ЯМР такой материал давал именно на T1-взвешенных изображениях (T1ВИ), поскольку эти изображения проще получить при высокой скорости сканирования.

Оказалось, что в качестве материала с необходимыми свойствами удобно использовать стандартную жевательную резинку (chewing gum), например, марки «Орбит» с черничным наполнителем. Этот материал доступен, не вызывает неприятия у испытуемого. Сильный сигнал для данного вещества на T1ВИ обусловлен как наличием определенных элементов в его составе, так и малой подвижностью молекул материала из-за вязкой структуры.

2. Экспериментальные методы и методики

Наши работы по наиболее полному моделированию на сагиттальном срезе ротовой полости контуров всех артикуляторных органов (в том числе состоящих из твердых кальциесодержащих тканей) проводились в три этапа. Целью первого этапа было получение высококачественных МР-изображений зубов методом слепка в статическом положении.

Во время второго этапа испытуемый повторял вслух по определенной методике экспериментальные речевые стимулы, но при этом слепочный материал не использовался, поскольку его присутствие могло вызвать искажения артикуляции (и, соответственно, звучания) при речепорождении. Для получения МР-изображений на этом этапе применялось быстрое сканирование.

На последнем этапе проводилось совмещение изображений зубов, полученных на первом этапе с изображениями артикуляторного тракта в моменты речевой фонации, полученными на втором этапе.

Все эксперименты были проведены на 0.5 Тл томографе Tomikon S50 («Bruker») в Центре магнитной томографии и спектроскопии МГУ. МР-сканирование проводилось по сагиттальному срезу шириной 9 мм и зоне сканирования – 20x12 см. Быстрое сканирование получено с использованием импульсной последовательности типа «градиентного эха» с параметрами: FA/TR/TE=10°/12/5.5 мс. При этих условиях удавалось получать достаточно качественные контрастные МР-изображения с частотой примерно 2-2,7 кадра в секунду и пространственным разрешением 3x3 мм. Сканирование проводилось многократными (128-256) запусками без перерывов внутри каждой серии МР-импульсов.

Качество полученных на первом этапе изображений позволило нам осуществить точную прорисовку контуров резцов верхней и нижней челюстей на сагиттальном срезе артику-

ляторного тракта испытуемого. Полученные МРТ-изображения и прорисованные контуры передних резцов верхней и нижней челюсти испытуемого представлены на рис. 2.

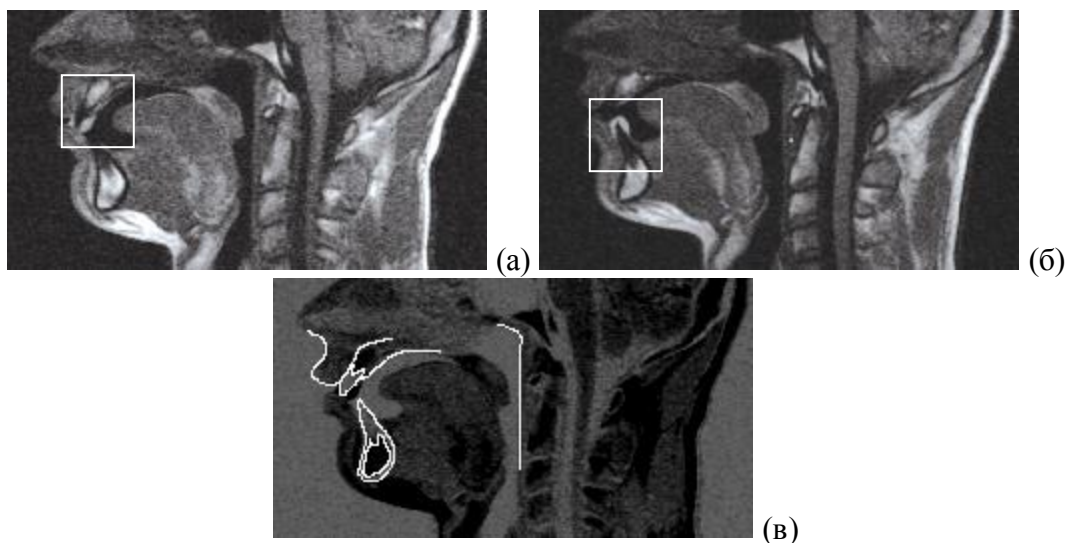
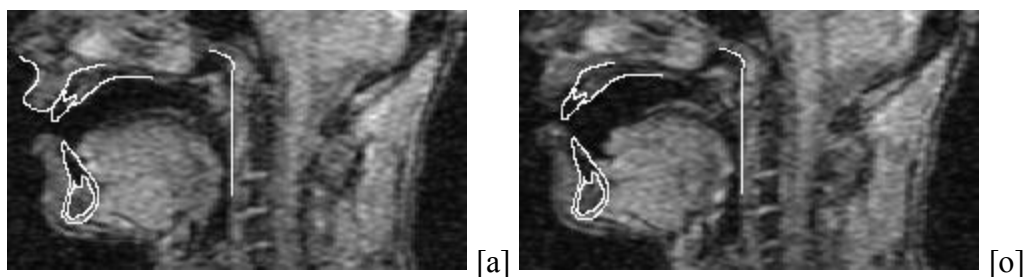


Рис. 2. МРТ-изображения артикуляторного тракта испытуемого (сагиттальный срез) с визуализацией контуров передних резцов верхней и нижней челюсти: (а) передние резцы верхней челюсти; (б) передние резцы нижней челюсти; (в) контуры твердых тканей верхней и нижней челюстей, наложенные на стандартное МРТ-изображение (полученное без использования зубных накладок).

3. Результаты

Мы провели совмещение прорисованных контуров верхних и нижних резцов на сагиттальном срезе артикуляторного тракта испытуемого с аналогичными МРТ-изображениями того же диктора в момент фонации всех основных гласных звуков русской речи в изолированной позиции. Правильность совмещения контролировалась по положению особых реперных точек согласно методике, предложенной в работе [6], и основанной на измерениях междикторской вариативности артикуляторного тракта. Идея совмещения, предложенная в указанной работе, основана на предположении о том, что взаимная конфигурация ряда реперных точек, определяемых на сагиттальных срезах, остается неизменной. Отметим, что согласно данным указанной работы, угловые и линейные индексы, характеризующие геометрию реперных точек, отражают особенности строения артикуляторного тракта у представителей европейской и азиатской рас.

На рис. 3 представлены МРТ-изображения, отображающие состояние мягкотканых органов при артикуляции основных гласных звуков русского языка, с прорисовкой контуров твердых тканей.



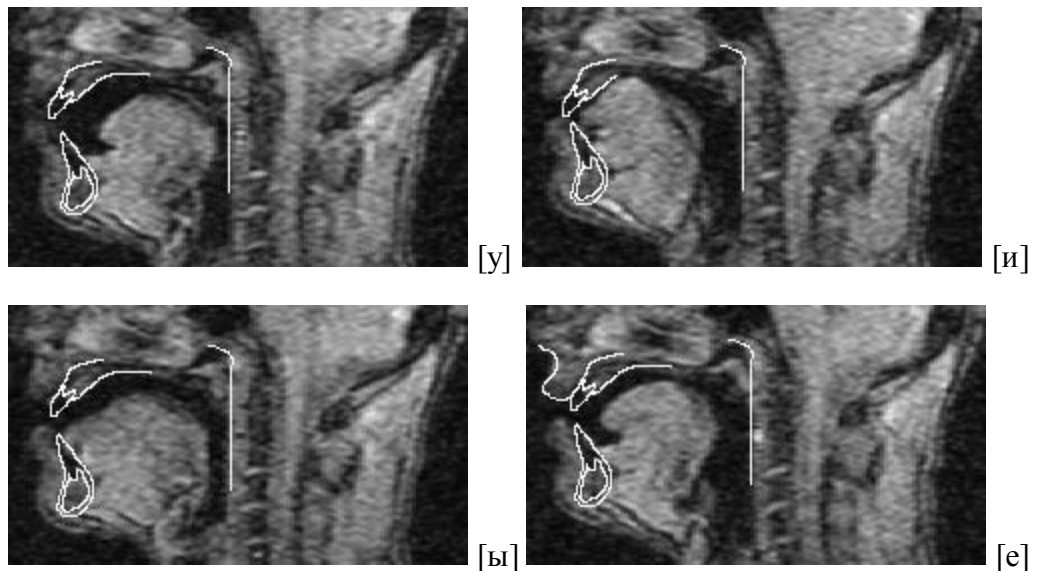


Рис. 3. Наложение контуров передних резцов верхней и нижней челюсти диктора на МРТ-изображения артикуляторного тракта при производстве основных русских гласных звуков.

4. Выводы

Совмещение обычных МРТ-изображений с прорисованными контурами верхних и нижних резцов на сагитальном срезе ротовой полости дает более достоверную визуализацию артикуляторного тракта в процессе производства речи, поскольку наряду с отображением мягкотканых органов позволяет оценить участие зубов в порождении звуков речи. Предварительные результаты свидетельствуют об эффективности применения метода реперных точек для управления таким совмещением. Проблемой является автоматизация данного процесса. Для прорисовки границ зубов весьма эффективным представляется использование метода слепка, где в качестве слепочного материала применяется пластичное малорастворимое вещество, дающее сильный сигнал ЯМР. В качестве такого вещества можно рекомендовать обычную жевательную резинку – дешевый, доступный, безопасный и привычный для испытуемого материал.

References

1. *Maeda, S.* Compensatory articulation during speech; evidence from the analysis and synthesis of vocal-tract shapes using an articulatory model // *Speech Production and Speech Modelling*, Eds. Hardcastle and Marchal, 1990.
2. *Скалозуб Л. Г.* Динамика звукообразования (по данным кинорентгенографирования), Киев, 1979.
3. *Кедрова Г.Е., Захаров Л.М., Анисимов Н.В., Пирогов Ю.А.* Исследование артикуляторной базы русского языка методами магнитно-резонансной томографии // XIII сессия Российского акустического общества. Сб. трудов. Т. 3. Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика. М.: ГУОС, 2003.
4. *Анисимов Н.В., Пирогов Ю.А., Губский Л.В., Гладун В.В.* Управление контрастом и информационные технологии в магнитно-резонансной томографии // Под ред. Ю.А. Пирогова. Изд-во физического факультета МГУ, М., 2005.
5. *Takemoto H., Kitamura T., Nishimoto H., and Honda K.* A method of tooth superimposition on MRI data for accurate measurement of vocal tract shape and dimensions // *Acoust. Sci. & Tech.* 25, 6: 468-474, 2004.

6. *Honda, K., Hashi, M., and Westbury, J.R.* Effect of the size and form of the orofacial structure on vowel production, *J. Acoust. Soc. Am.*, 102, Pt. 2: 3133, 1997.