

Т. Г. КАЛЕКИНА, С. О. КОТЛЯРОВ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛЛОФОНИЧЕСКОГО УРОВНЯ
ДЛЯ ГЛАСНЫХ РУССКОГО ЯЗЫКА В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ РЕЧИ**

Модель фонологической обработки текста позволяет осуществить переход от орфографического текста к фонемному. Перед нами стоит задача построения математической модели аллофонической обработки фонемного текста. В этом случае описывается фрагментное отношение $T(Y, \alpha)$, отражающее связь между фонемным текстом и аллофоническим:

$$T(Y, \alpha) = T_1(Y; \alpha) T_2(Y, \alpha),$$

где $T_1(Y, \alpha)$ — отношение, описывающее фонемно-аллофонный переход для гласных; $T_2(Y, \alpha)$ — то же для согласных. При этом $\alpha \in M$, M — множество аллофонов; $Y \in H$, H — множество всевозможных позиций фонем в слове. В своей трактовке фонемного уровня мы следовали концепции ленинградской фонологической школы. Поэтому на данном этапе нам необходимо каждую фонему представить в виде совокупности аллофонов

Для введения системы аллофонов гласных фонем обратимся к данным экспериментально-фонетического исследования речи [1, 2]. При изучении восприятия гласных русской речи удалось

установить, что носители языка фиксируют не только различия звуков, противопоставленных фонематически, но и те различия звуков, которые не имеют фонематического значения, а обнаруживают только фонетические различия. Число воспринимаемых человеком звуковых единиц значительно превышает количество гласных лингвистических фонем русского языка. В работе [2] исследовались гласные в различном фонетическом окружении. В результате был сделан вывод о том, что человек в речевом общении различает 18 гласных звуков. Их мы будем рассматривать в качестве базовых эталонных единиц в моделируемой системе. И будем также считать, что «существование именно восемнадцати эталонов русских гласных означает, что любой гласный, встречающийся в русской речи, должен отождествляться носителями русского языка с одним из этих эталонов» [2]. При этом оказывается, что одному и тому же воспринимаемому звуку в разных позициях соответствуют разные физические корреляты. Руководствуясь практическими соображениями использования базовых эталонных единиц в системе автоматической обработки речи, необходимо математически описать связи эталонных единиц с аллофонами фонем и через них, соответственно, с фонемами.

Итак, переходим к задаче построения математической модели аллофонической обработки русских гласных путем формального описания фрагментного отношения $T_1(Y, \alpha)$. Введем переменную α , которая принимает 18 установленных значений эталонных единиц. В дальнейшем изложении эталонные звуковые единицы будут заключаться в круглые скобки, например (а), аллофоны фонем — в косые скобки, например /e/, фонемы — в квадратные, например [а]. Используется также дополнительный значок ' для обозначения мягкости. Следующее уравнение формально задает область изменения введенной переменной:

$$\alpha^a \vee \alpha^a \vee \alpha^{a'} \vee \alpha^{a'} \vee \alpha^o \vee \alpha^o \vee \alpha^{o'} \vee \alpha^{o'} \vee \alpha^y \vee \alpha^y \vee \alpha^{y'} \vee \alpha^{y'} \vee \alpha^e \vee \alpha^e \vee \alpha^{e'} \vee \alpha^{e'} \vee \alpha^n \vee \alpha^n.$$

Переменную α назовем аллофоном и введем также на множестве восемнадцати выявленных гласных русской речи:

$$\alpha^a \vee \alpha^a \vee \alpha^{a'} \vee \alpha^{a'} \vee \alpha^o \vee \alpha^o \vee \alpha^{o'} \vee \alpha^{o'} \vee \alpha^e \vee \alpha^e \vee \alpha^{e'} \vee \alpha^{e'} \vee \alpha^y \vee \alpha^y \vee \alpha^{y'} \vee \alpha^{y'} \vee \alpha^n \vee \alpha^n.$$

Анализируя введенное множество звуковых единиц, следует подчеркнуть, что носители русского языка различают четыре разных фонемы [а], [о], [у], [е] между твердыми, твердыми и мягкими, мягкими и твердыми и между мягкими. Фонемы [и] и [ы] не зависят от мягкости или твердости соседних согласных.

Представленный набор звуковых единиц говорит о том, что человек в звуковом процессе фиксирует не все позиционные варианты гласных фонем, а замечают только те различия, которые

образуются в зависимости от соседства с твердыми или мягкими согласными. Носитель русского языка не воспринимает те различия гласных фонем, которые определяются соседством с согласными, разными по способу и месту образования, по участию голоса или наличию назализации. На основании изложенного мы можем считать, что область изменения α для гласных определена, а компонентами вектора позиции Y являются переменные U , q_- , q_+ , т. е. фонема с признаком палатализации.

Следующие уравнения алгебры конечных предикатов формально описывают переход от гласной фонемы к соответствующему аллофону с учетом позиционных условий, которые выражаются набором признаков q_- , q_+ . Запишем уравнения для фонемы [a]. В твердом окружении она соответствует аллофону |a| в мягком |'a'|:

$$U^a q_-^T q_+^T \sim \alpha^a; U^a q_-^M q_+^T \sim \alpha'^a.$$

Фонема [a] после твердого перед мягким согласным соответствует аллофону |a'|, а после мягкого перед твердым согласным — |'a'|:

$$U^a q_-^T q_+^M \sim \alpha^a'; U^a q_-^M q_+^T \sim \alpha'^a.$$

Фонема [o] описывается системой аналогичных уравнений:

$$U^o q_-^T q_+^T \sim \alpha^o; U^o q_-^M q_+^M \sim \alpha'^o.$$

Фонема [e] представляется системой уравнений

$$U^e q_-^T q_+^T \sim \alpha^e; U^e q_-^M q_+^M \sim \alpha'^e'; U^e q_-^T q_+^M \sim \alpha^{e'}; U^e q_-^M q_+^T \sim \alpha'^e.$$

Фонема [y] описывается системой уравнений

$$U^y q_-^T q_+^T \sim \alpha^y; U^y q_-^M q_+^M \sim \alpha'^y'; U^y q_-^T q_+^M \sim \alpha^{y'}; U^y q_-^M q_+^T \sim \alpha'^y.$$

Для фонем [и] и [ы], независимых от признака палатализации, запишем уравнения

$$U^и \sim \alpha^и; U^ы \sim \alpha^ы.$$

Теперь перейдем к построению уравнений, которые описывают отношения аллофонов фонем с эталонными единицами, опираясь при этом на исследования восприятия речи. Каждая фонема в системе представляется определенным набором эталонов. Формально описываем связь базовых эталонных единиц с лингвистическими фонемами:

$$U^a \supset \mathcal{E}^a \vee \mathcal{E}'^a \vee \mathcal{E}^a' \vee \mathcal{E}'^a'; U^o \supset \mathcal{E}^o \vee \mathcal{E}'^o \vee \mathcal{E}^o \vee \mathcal{E}'^o';$$

$$U^y \supset \mathcal{E}^y \vee \mathcal{E}'^y \vee \mathcal{E}^y' \vee \mathcal{E}'^y'; U^e \supset \mathcal{E}^e \vee \mathcal{E}'^e \vee \mathcal{E}^e' \vee \mathcal{E}'^e';$$

$$U^и \supset \mathcal{E}^и; U^ы \supset \mathcal{E}^ы.$$

Статистические данные, характеризующие отождествление тех или иных гласных с определенными базовыми эталонными единицами, показывают, что связь эталонов с неадекватными ал-

лофонами объясняется объективными свойствами звуков, определяющихся особенностями конкретных произнесений. Исследуя качество звуков, т. е. обращаясь к спектральному и осциллографическому анализам речи, можно сделать вывод о том, что существует прямая связь между спектральными и осциллографическими характеристиками гласных и их восприятием. Акустическая близость двух звуков, являющихся аллофонами разных фонем, связана с их артикуляционной близостью, так как акустические изменения звуков — следствие артикуляционных. Только те аллофоны фонем идентифицируются с одним эталоном, которые имеют общие акустические и артикуляционные характеристики.

Строим модели для ударных гласных полного стиля произношения. Это условие описывает уравнение $f^y g^n \text{Глс}(U) = 1$, где Глс(И) — индивидуальный предикат, формализующий понятие гласной фонемы; g — признак стиля произношения со значениями n — полный, b — быстрый. Переменная f называется признаком ударности. В полном стиле произношения эталонные единицы в большинстве случаев однозначно связываются с определенными аллофонами фонем, но иногда встречаются нарушения. Рассмотрим связи, в которых нарушается однозначный переход. Как эталон (а) воспринимаются не только аллофоны фонемы [а] между твердыми согласными, но и некоторая часть аллофонов после твердого перед мягким:

$$\text{Э}^a \supset \alpha^a \vee \alpha^{a'}.$$

Как эталон (о) опознается не только аллофон фонемы [0] между твердыми согласными, но и часть аллофонов после твердых перед мягкими:

$$\text{Э}^o \supset \alpha^o \vee \alpha^{o'}.$$

Такая же закономерность наблюдается и при анализе эталонов (у), (е): как соответствующие эталоны воспринимаются не только аллофоны фонем [у] и [е] в положении между твердыми согласными, но и аллофоны тех же фонем в положении между твердыми и мягкими:

$$\text{Э}^y \supset \alpha^y \vee \alpha^{y'}; \text{Э}^e \supset \alpha^e \vee \alpha^{e'}.$$

Как эталон ('о') воспринимаются не только аллофоны фонемы [о] между мягкими согласными, но и часть аллофонов после мягких перед твердыми:

$$\text{Э}'^o \supset \alpha'^o \vee \alpha'^o.$$

Как эталон ('у) определяются не только аллофоны фонемы [у] после мягких перед твердыми, но и некоторые аллофоны той же фонемы между мягкими согласными:

$$\text{Э}'^y \supset \alpha'^y \vee \alpha'^{y'}.$$

Все отмеченное несоответствие обуславливается тем, что объективные характеристики соответствующих гласных существенно

изменяются от одного произношения к другому, и в ряде случаев такие аллофоны, как /a'/, /o'/, /y'/, /e'/, по звучанию ничем не отличаются от аллофонов, относимых к другим эталонам.

Мы построили уравнения для смещений разных аллофонов одной и той же фонемы, однако практика показывает, что возможно отождествление с одним и тем же эталоном аллофонов разных фонем. Рассмотрим подобные смещения.

Часть звуков, воспринимаемых как (e), в действительности соответствует аллофону фонем [a] в положении между мягкими согласными:

$$\mathfrak{E} \supset \alpha^e \vee \alpha^{a'}$$

Некоторые звуки, отождествленные с (и), реально соответствуют аллофону фонемы [e] в положении между мягкими:

$$\mathfrak{E}^и \supset \alpha^{e'} \vee \alpha^и$$

Описанные смещения имеют физическое объяснение. Фонема [e] в положении между мягкими становится более закрытой, приближаясь к фонеме [и], а фонема [a] в том же положении становится более закрытой, несколько продвигается вперед и по артикуляции, а следовательно, и по акустическим свойствам оказывается близкой к фонеме [e].

Рассмотрим отношения эталонных единиц с аллофонами для быстрого (разговорного) стиля произношения. Редукция гласных в таком случае определяется прежде всего убыстрением темпа речи. Длительность гласных уменьшается в два-три раза. Однако различие в темпе не сказывается на количестве звуковых единиц. Вместе с тем, хотя набор эталонов в обоих стилях произношения совпадает, соотношенность каждого эталона с аллофонами фонем различна, в быстром стиле произношения наблюдается семь случаев нарушения фонематических связей. Условие произношения ударных гласных быстрого стиля запишем уравнением

$$f^y g^6 \Gamma_{лс}(U) = 1.$$

Как эталон (a) в быстром стиле воспринимаются не только аллофоны фонемы [a] между твердыми согласными и некоторая часть аллофонов после твердого согласного перед мягким, как в полном стиле произношения, но и большая часть аллофонов после мягкого перед твердым и даже незначительная часть аллофонов фонемы [e] в положении между твердыми согласными: $\mathfrak{E}^a \supset \alpha^a \vee \alpha^{a'} \vee \alpha^e$. Как эталон (e') воспринимаются не только аллофоны фонемы [e] в положении между мягкими, но и некоторая часть аллофонов после мягкого перед твердыми, а также аллофон фонемы [a] в положении между мягкими и аллофоны фонемы [a] после твердых перед мягкими:

$$\mathfrak{E}^{e'} \supset \alpha^{e'} \vee \alpha^{e'} \vee \alpha^{a'} \vee \alpha^o$$

Часть звуков, опознанных как (e), в действительности соответствует аллофону фонемы [o] в положении между мягкими,

твердыми и мягкими: $\mathcal{E}^e \supset \alpha'^a \vee \alpha^a$. Часть звуков, отождествленных с эталоном (и), реально представляет аллофон фонемы [e] в положении между мягкими: $\mathcal{E}^u \supset \alpha'^e$.

Аллофон фонемы [a] после мягкого перед твердым согласным может восприниматься как ('o): $\mathcal{E}'^o \supset \alpha'^a$.

Аллофон фонемы [o] после твердого перед мягким согласным и фонема [ы] могут быть опознаны как ('y): $\mathcal{E}'^y \supset \alpha^o \vee \alpha^u$. Часть звуков, воспринятых как эталон (ы), в действительности соответствует аллофону фонемы [e] после твердого перед мягкими $\mathcal{E}^u \supset \alpha^e$.

Из изложенного ясно, что звуки распределяются по эталонам, которые связаны с другими фонемами. Естественно, что длительность гласных при этом играет роль. Чем больше их длительность, тем больше вероятность адекватного восприятия звука; чем она меньше, тем больше вероятность неадекватного восприятия.

Перейдем к формальному описанию связи аллофонов безударных гласных фонем с эталонами. При произнесении безударных гласных происходит количественная и качественная редукция гласных. Безударные гласные не обладают теми же акустическими и артикуляционными характеристиками, которые свойственны соответствующим ударным, поскольку времени для произнесения ударного гласного достаточно, чтобы реализовать весь артикуляционный комплекс. При произнесении безударных гласных сокращение их длительности приводит к тому, что артикуляционный комплекс нарушается и безударные гласные редуцируются. Основное различие между ударными гласными и безударными состоит в длительности этих звуков [1]. Под ударением в русском произношении могут употребляться шесть гласных а, о, у, е, и, ы, а в безударных слогах — только четыре а, у, и, ы.

Безударные гласные рассматриваются только для полного стиля произношения, т. е. $f^6 g^n \Gamma_{\text{лс}}(и) = 1$, так как длительность гласных быстрого стиля настолько мала, что выделить их чрезвычайно трудно, как и опознать в них звуки речи. В безударном положении не встречаются фонемы [o] и [e] и соответственно их аллофоны: $\overline{f^6 u^o}$; $\overline{f^6 u^e}$.

В безударном положении не встречаются аллофоны фонемы [a] после мягкого перед твердым, между мягкими: $f^6 U^a \supset \alpha'^a \vee \alpha'^a$. На основании экспериментальных данных можно ввести шесть эталонных единиц безударных гласных и пять аллофонов безударных гласных фонем. Следующее уравнение формально задает область изменения переменных \mathcal{E}, α : $f^6 \Gamma_{\text{лс}}(U) \supset (\alpha^a \vee \alpha^u \vee \alpha^u \vee \alpha^y \vee \alpha'^y) (\mathcal{E}^a \vee \mathcal{E}^u \vee \mathcal{E}^u \vee \mathcal{E}^e \vee \mathcal{E}^y \vee \mathcal{E}'^y)$.

Соотнесенность аллофонов фонем с соответствующими эталонными единицами для безударных гласных нарушена гораздо сильнее. Наблюдается смещение в одном эталоне аллофонов разных

фонем. Эталон (а) связан не только с фонемой [а], но и с фонемами [ы] и [у]: $\bar{\text{Э}}^a \supset \alpha^a \vee \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{y}}$. Эталон (у) связан не только с фонемой [у], но и с фонемой [ы]: $\bar{\text{Э}}^y \supset \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{y}}$. Как эталон ('у) воспринимаются не только аллофон фонемы [у], но и аллофоны фонем [и], [а], [ы]: $\bar{\text{Э}}^{\bar{y}} \supset \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{a}} \alpha^{\bar{y}}$. Как эталон (и) могут опознаваться не только аллофоны фонемы [и], но и [ы]: $\bar{\text{Э}}^{\bar{y}} \supset \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{y}}$. Эталон (ы) связан не только с фонемой [ы], но и с фонемами [а], [у], [и]: $\bar{\text{Э}}^{\bar{y}} \supset \alpha^{\bar{a}} \vee \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{y}}$.

Особый интерес представляет эталон (е). Из всех звуков воспринятых как эталон (е), ни один звук не соответствует фонеме [е]. С эталоном (е) отождествляется ряд аллофонов разных фонем: $\bar{\text{Э}}^e \supset \alpha^{\bar{a}'} \vee \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{y}} \vee \alpha^{\bar{y}'} \vee \alpha^{\bar{y}}$.

Причиной такого серьезного нарушения связи между эталонами и фонемами является небольшая длительность безударных гласных. Человек отождествляет предъявленные звуки с теми базовыми единицами, с которыми у звуков оказывается что-то общее. Отождествление звука с неадекватной базовой единицей объясняется сходством их объективных характеристик. Это доказывает спектральный анализ звуков, который показал, что аллофоны фонем [а], [и], [ы], [у] отождествляются с эталоном (е) только тогда, когда их частотные характеристики совпадают с частотными характеристиками ударной фонемы [е].

Список литературы: 1. Бондаренко Л. В. Звуковой строй современного русского языка. — М.: Просвещение, 1977.—120 с. 2. Вербицкая Л. А. Звуковые единицы русской речи и их соотношение с оттенками и фонемами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1965.— 19 с.

Поступила в редколлегию 10.02.85