

---

УДК 510. 62

*Т. Г. КАЛЕКИНА*

**О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ  
ЗВУКОВЫХ СОЧЕТАНИЙ**

---

Современный подход к автоматическому пониманию речи заключается в привлечении лингвистической информации для полного распознавания речевого сообщения. Аналогично тому, как человек использует в естественном речевом общении свое знание языка, системам автоматического понимания речи необхо-

дима лингвистическая информация. Автоматическая проверка на сочетаемость соседних звуков требуется как в задачах анализа речи, после автоматического распознавания входного акустического сигнала, так и в задачах синтеза речи, после автоматического перехода от орфографического представления текста к фонетическому, для коррекции ошибок и устранения неопределенностей.

Чтобы решить эту задачу, необходимо располагать уравнениями, математически описывающими запреты звуковых сочетаний, которые накладывает фонетическая система русского языка [1]. Решая эти уравнения, вычислительная машина сможет определить ошибки и неопределенности акустического анализа и фонетического моделирования. Настоящая статья посвящена построению уравнений для звуковых ограничений, действующих в пределах всей лексики русского языка. Уравнения записываем на языке алгебры конечных предикатов [2.] Введем необходимые признаки. Разделим все звуки речи признаком  $f$  на  $z$  — собственно звуки,  $*$  — паузу. Знак  $*$  означает отсутствие звука  $f^z \vee f^*$ ,  $f^* \sim x^*$ .

Собственно звуки разделим признаком  $e$  на  $g$  — гласные,  $c$  — согласные, а признаком  $d$  на  $ш$  — шумные и  $н$  — нешумные:  $f^z \sim e^g \vee e^c$ ;  $f^z \sim d^ш \vee d^н$ . Нешумные звуки делим признаком  $q$  на  $c$  — сонорные и  $г$  — гласные:  $d^н \sim q^c \vee q^г$ ,  $e^г \sim q^г$ .

Совокупность всех шумных звуков разделим по способу образования переменной  $l$  на два класса:  $a$  — аффрикаты,  $н$  — неаффрикаты:  $d^ш \sim l^a \vee l^н$ . Множество  $н$  делим признаком  $v$  на  $c$  — смычные,  $щ$  — щелевые:  $l^н \sim v^c \vee v^щ$ .

Теперь совокупность всех согласных звуков разделим по месту образования переменной  $h$  на три класса:  $г$  — губные,  $п$  — переднеязычные,  $з$  — заднеязычные:  $e^c \sim h^г \vee h^п \vee h^з$ . Множество  $п$  делим переменной  $s$  на  $з$  — зубные,  $н$  — небоно-зубные:  $h^п \sim c^з \vee v^c$ . Множество гласных и сонорных звуков переменной  $k$  разделяются каждый на пять более мелких классов звуков:

$$e^г \sim k^a \vee k^o \vee k^y \vee k^м \vee k^з; \quad q^c \sim k^п \vee k^л \vee k^м \vee k^н \vee k^з.$$

Множество смычных звуков распадается на шесть классов:

$$v^c \sim k^п \vee k^б \vee k^т \vee k^д \vee k^к \vee k^г.$$

Множество щелевых звуков распадается на семь классов:

$$v^щ \sim k^в \vee k^ф \vee k^с \vee k^з \vee k^ш \vee k^ж \vee k^х.$$

Множество губных звуков подразделяется на шесть классов, заднеязычных — на три класса, зубных — на семь классов:

$$h^г \sim k^п \vee k^б \vee k^в \vee k^ф \vee k^м, \quad h^з \sim k^к \vee k^г \vee k^х, \\ c^з \sim k^т \vee k^д \vee k^ц \vee k^с \vee k^з \vee k^н \vee k^л.$$

Множество небоно-зубных делится на четыре класса:

$$c^н \sim k^ч \vee k^ш \vee k^ж \vee k^р.$$

Каждый класс  $k$  распадается на отдельные звуки речи. Запишем уравнения связей между соответствующими классами и звуками речи. Для гласных

$$k^a \sim x^a \vee x'^a \vee x^a \vee x^a, \quad k^o \sim x^o \vee x'^o \vee x^o \vee x^{\bar{o}}, \\ k^y \sim x^y \vee x'^y \vee x^y \vee x^{\bar{y}}, \quad k^u \sim x^u \vee x^{\bar{u}}, \quad k^s \sim x^s \vee x^{\bar{s}}.$$

Для сонорных

$$k^{\bar{n}} \sim x^{\bar{n}} \vee x^{\bar{n}}, \quad k^{\bar{l}} \sim x^{\bar{l}} \vee x^{\bar{l}} \vee x^{\bar{l}} \vee x^{\bar{l}}, \\ k^m \sim x^m \vee x^m \vee x^{\bar{m}} \vee x^{\bar{m}}, \\ k^n \sim x^n \vee x^n \vee x^{\bar{n}} \vee x^{\bar{n}}, \quad k^p \sim x^p \vee x^p \vee x^{\bar{p}} \vee x^{\bar{p}}.$$

Для шумных согласных

$$k^r \sim x^r \vee x^{\bar{r}} \vee x^{\bar{r}} \vee x^r \vee x^{\bar{r}}, \quad k^k \sim x^k \vee x^{\bar{k}}, \\ k^x \sim x^x \vee x^{\bar{x}}, \quad k^s \sim x^s \vee x^{\bar{s}}, \quad k^c \sim x^c \vee x^{\bar{c}}, \\ k^u \sim x^u \vee x^{\bar{u}} \vee x^{\bar{u}}, \quad k^j \sim x^j \vee x^{\bar{j}}, \quad k^w \sim x^w \vee x^{\bar{w}}, \\ k^q \sim x^q \vee x^{\bar{q}} \vee x^{\bar{q}}, \quad k^b \sim x^b \vee x^{\bar{b}} \vee x^{\bar{b}} \vee x^{\bar{b}}, \\ k^v \sim x^v \vee x^{\bar{v}}, \quad k^p \sim x^p \vee x^{\bar{p}} \vee x^{\bar{p}} \vee x^{\bar{p}}, \\ k^f \sim x^f \vee x^{\bar{f}}, \quad k^d \sim x^d \vee x^{\bar{d}} \vee x^{\bar{d}} \vee x^{\bar{d}}, \quad k^t \sim x^t \vee x^{\bar{t}} \vee x^{\bar{t}} \vee x^{\bar{t}}.$$

Разделим все звуки речи признаком  $p$  на з — звонкие, г — глухие. Звонкие звуки произносятся с голосом, глухие — без него

$$p^s \sim f^s \vee k^r \vee k^s \vee x^u \vee k^j \vee x^q \vee k^b \vee k^v \vee k^d; \\ p^g \sim k^x \vee k^k \vee k^c \vee x^u \vee x^{\bar{u}} \vee k^w \vee k^p \vee x^q \vee x^{\bar{q}} \vee k^f \vee x^*.$$

Все звуки речи признаком  $y$  делятся на т — твердые, м — мягкие при этом паузу относим к твердым звукам:

$$y^t \sim x^a \vee x^o \vee x^y \vee x^u \vee x^s \vee x^l \vee x^m \vee x^{\bar{l}} \vee \\ \vee x^{\bar{m}} \vee x^h \vee x^{\bar{h}} \vee x^p \vee x^{\bar{p}} \vee x^r \vee x^r \vee x^k \vee x^x \vee \\ \vee x^s \vee x^c \vee x^u \vee x^{\bar{u}} \vee x^j \vee x^w \vee x^q \vee x^b \vee x^v \vee \\ \vee x^p \vee x^{\bar{p}} \vee x^f \vee x^d \vee x^{\bar{d}} \vee x^t \vee x^{\bar{t}} \vee x^*. \\ y^m \sim \bar{f}^s y^t.$$

Сначала опишем запреты на двучленные сочетания соседних звуков. Пусть  $(x_1, x_2)$  — пара соседних звуков в потоке речи или в фонетической записи текста. Индексом 1 обозначен звук произнесенный первым, индексом 2 — звук, произнесенный вторым. Переменным, которые являются признаками звуков  $x_1, x_2$ , будем присваивать соответственно индексы 1 и 2. Ниже следует словесная формулировка лингвистических законов сочетаний соседних звуков речи и их перевод на язык уравнений алгебры ко

звонких предикатов. Существуют ограничения в сочетаемости гласных звуков по признакам глухости — звонкости, палатализации, а также по способу и месту образования звуков. Формализуем три правила, которые описывают свойства звонкости и глухости звуков.

Не допускаются сочетания любого глухого с любым звонким гласным, за исключением сонорных и [в]:  $p_1^{\Gamma} p_2^{\text{з}} \supset k_2^{\text{з}} \vee q_2^{\text{з}}$ .

Любой звонкий, за исключением сонорного, не сочетается с любым глухим:  $p_1^{\text{з}} p_2^{\Gamma} \supset q_1^{\text{з}}$ . Звонкий шумный не сочетается с следующей паузой:  $p_1^{\text{з}} x_2$ .

Следующая группа правил ограничивает сочетаемость звуков по признаку палатализации. Не допускаются сочетания мягкого переднеязычного смычного или щелевого с твердым губным смычным или щелевым, за исключением [д'], [з'] перед [б], [т'] перед [ф]:

$$y_1^{\text{м}} h_1^{\text{п}} l_1^{\text{п}} y_2^{\text{т}} h_2^{\text{т}} l_2^{\text{т}} \supset (k_1^{\text{т}} \vee k_1^{\text{з}}) k_2^{\text{б}} \vee k_1^{\text{т}} k_2^{\text{ф}}$$

Твердый переднеязычный щелевой не сочетается с мягким переднеязычным смычным:  $y_2^{\text{м}} h_2^{\text{п}} v_2^{\text{п}} h_1^{\text{п}} v_1^{\text{ш}} \supset y_1^{\text{м}}$ .

Мягкие заднеязычные не сочетаются со следующим согласным другого места образования, кроме [j]:  $y_1^{\text{м}} h_1^{\text{з}} h_2^{\text{з}} \supset x_2^{\text{л}}$ . После всех твердых согласных, если они не небо-зубные шумные, не может следовать [j]:  $y_1^{\text{т}} e_1^{\text{з}} x_2^{\text{л}} \supset c_1^{\text{н}} d_1^{\text{ш}}$ .

Любые два рядом стоящие согласные звуки либо оба твердые, либо оба мягкие, если они одинаковы во всем остальном:

$$e_1^{\text{з}} e_2^{\text{з}} (k_1 = k_2) \supset (y_1 = y_2).$$

Губные звуки, стоящие рядом, оба мягкие или оба твердые:  $h_1^{\text{т}} h_2^{\text{з}} \supset (y_1 = y_2)$ . Небно-зубные, стоящие рядом, эквивалентны по твердости и мягкости:  $c_1^{\text{н}} c_2^{\text{н}} \supset (y_1 = y_2)$ . Твердый зубной звук, если это не звук [л], не может сочетаться со следующим мягким зубным:  $y_1^{\text{т}} c_1^{\text{з}} y_2^{\text{з}} c_2^{\text{з}} \supset k_1^{\text{л}}$ .

Ниже следуют три правила, регулирующие произношение сонорных. После мягких зубных, кроме [л], не может следовать звук [р]:  $y_1^{\text{м}} c_1^{\text{з}} k_2^{\text{п}} \supset k_1^{\text{л}}$ . После звука [р'] невозможны небо-зубные шумные:  $y_1^{\text{м}} k_1^{\text{п}} c_2^{\text{н}} d_2^{\text{ш}}$ .

Звук [н] перед мягкими шумными небо-зубными и переднеязычными смычными всегда произносится мягко:

$$y_2^{\text{м}} (c_2^{\text{н}} d_2^{\text{ш}} \vee h_2^{\text{п}} v_2^{\text{з}}) \supset y_1^{\text{м}} k_1^{\text{н}}$$

Записанные следующие четыре уравнения формализуют правила, ограничивающие сочетаемость звуков по месту и способу образования. Зубной смычный или щелевой не сочетается с [ч]:  $c_1^{\text{з}} l_1^{\text{н}} k_2^{\text{з}}$ . Запрещено сочетание зубного щелевого с небо-зубным щелевым:

$c_1^a v_1^m \supset c_2^h v_2^m$ . Не допускается сочетание зубного щелевого с ш]  $c_1^a v_1^m k_2^m$ . Фонетически запрещены сочетания согласных одинакового способа и места образования

$$f_1^a f_2^a \supset (l_1^a \neq l_2^a) (v_1 \neq v_2) (h_1 \neq h_2) (c_1 \neq c_2).$$

Следующие три правила регулируют произношение гласных звуков. Гласный звук, следующий за мягкими согласными, всегда мягкий, следующий за твердыми согласными — всегда твердый:  $l_1^f l_2^f \supset (y_1 = y_2)$ . Гласный звук, предшествующий мягкому согласному, всегда мягкий, предшествующий твердому согласному — всегда твердый:  $l_1^f l_2^c \supset (y_1 = y_2)$ . Пауза не сочетается со следующими за ней звуками [e], [ë], [ю], [я]:

$$\overline{x_1^* (x_2^e \vee x_2^ë \vee x_2^y \vee x_2^a)}.$$

Переходим к описанию трехчленных сочетаний согласных звуков. ( $x_1, x_2, x_3$ ) — соседние звуки в речевом потоке или в фонетической модели. Индексы 1, 2, 3 аналогичны индексам в двухчленных сочетаниях. Некоторые сочетания согласных, представленные в орфографической записи как трехчленные, не могут выступать как трехчленные фонетически. Поэтому в качестве трехчленных сочетаний недопустимы следующие группы согласных: переднеязычный смычный глухой + зубной щелевой глухой + [в]: [в'], [к], [к'], [л], [л'], [м], [м'], [н'], [п], [р], [т], [т']:

$$(q_3^c \vee k_3^a \vee k_3^k \vee x_3^n \vee x_3^r \vee x_3^{r'}) \supset \overline{k_1^r k_2^c},$$

переднеязычный смычный + зубной щелевой + небно-зубная аффриката:

$$\overline{h_1^n v_1^c c_2^a v_2^m k_3^a},$$

зубной щелевой + зубной щелевой + небно-зубная аффриката:

$$\overline{c_1^a v_1^m c_2^a v_2^m k_3^a},$$

зубной щелевой + переднеязычный смычный + переднеязычный смычно-проходной:

$$c_1^a v_1^m (k_3^r \vee k_3^h) \supset \overline{h_2^n v_2^c},$$

зубной щелевой + переднеязычный смычный + переднеязычная аффриката:

$$c_1^a v_1^m k_3^u \supset \overline{h_2^n v_2^c},$$

переднеязычный смычно-проходной + переднеязычный смычный + небно-зубной щелевой:

$$k_1^h c_3^h v_3^m \supset \overline{h_2^n v_2^c},$$

звук [н] или заднеязычный смычный + два звука переднеязычных:

$$(k_1^h \vee h_1^a v_1^c) h_3^c v_3^c \supset \overline{h_2^c v_2^c},$$

звук [н] + переднеязычный смычный + заднеязычный смычный:

$$k_1^h h_3^a v_3^c \supset h_2^p v_2^c,$$

звук [л] + звук [н] + зубная аффриката:

$$\overline{k_1^h k_2^h k_3^u},$$

звук [н] + переднеязычный смычный + зубная аффриката:

$$\overline{x_1^h h_2^p v_2^c x_3^u},$$

сонорный дрожащий + переднеязычный смычный + зубная или  
небно-зубная аффриката:

$$\overline{x_1^p h_2^p v_2^c (x_3^u \vee x_3^q)}.$$

Рассмотрим наиболее широко представленные типы трехчлен-  
ных сочетаний: «шумный + шумный + сонорный»:

$$d_1^m d_2^m q_3^c \supset y_1^t y_2^t k_3^j;$$

«шумный + шумный + шумный»:

$$d_1^m d_2^m d_3^m \supset \overline{y_2^m y_3^t},$$

для двух конечных членов названных сочетаний согласных недо-  
пустимы сочетания, которые невозможны и как двучленные:

$$d_1^m (d_2^m \vee q_2^c) f_3^* \supset \overline{y_1^m y_2^t},$$

для двух начальных членов трехчленных сочетаний типа «сонор-  
ный + шумный + шумный» справедливо соотношение, которое рас-  
пространяется и на двучленные сочетания:  $f_1^* q_2^c d_3^m \supset y_2^t$ .

Уравнения, записанные для двух начальных и двух конечных  
фонем трехчленных сочетаний, необходимы при математическом  
моделировании орфофонетических отношений; в задачах ана-  
лиза речи эти уравнения не используются, так как сегментация  
речевого потока на отдельные слова является задачей более вы-  
сокого семантического уровня.

Четырехчленные сочетания согласных звуков представля-  
ют собой комбинацию трех двучленных сочетаний. Например:  
[кств] → [кс] + [ст] + [тв]. Таким образом, фонетические ограни-  
чения, существующие в пределах двучленных сочетаний, дейст-  
вительны и для четырехчленных сочетаний. Поэтому отдельно  
четырехчленные сочетания в работе не описываются.

Список литературы: 1. Аванесов Р. И. Русское литературное произношение.  
— М.: Просвещение, 1972.— 412 с. 2. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Начало  
теории интеллекта: Математические средства.— Рукопись деп. в ВИНТИ,  
№ 3322-82.— 240 с.

Поступила в редколлегию 27.06.83.