

Исследование акустической вариативности *s* методом главных компонент

И. А. Зибер, Г. А. Мороз

*Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
Москва, Россия*

Аннотация

Статья посвящена оценке степени акустической вариативности альвеолярного сибиланта *s* в разных языках. В работе привлекается материал пяти неродственных языков народов России с различными фонетическими системами: адыгейского, нанайского, русского, удмуртского и чукотского. Рассматривается в первую очередь вариативность единиц в одном и том же контексте в условиях контроля максимального числа параметров. Анализируются полевые записи авторов. Произнесения были размечены вручную, затем информация о спектре автоматически извлекалась и трансформировалась методом линейного предиктивного кодирования. Полученные спектральные срезы анализировались по десяти параметрам: частота первого пика (в герцах и барках), угловой коэффициент, отражающий крутизну подъема огибающей до первого пика, спектральный центр масс (в герцах и барках), стандартное отклонение (в герцах и барках), асимметрия и эксцесс. Поскольку анализировать все эти меры одновременно не представляется возможным, для уменьшения числа переменных был использован метод главных компонент. Кумулятивная доля дисперсии, объясненная двумя первыми главными компонентами, составила 65 %. В статье показано, как с помощью метода главных компонент можно измерить и сравнить вариативность произнесений *s* в разных языках. В результате исследования: 1) был создан алгоритм анализа вариативности, который может использоваться и в других областях акустики; 2) можно заключить, что у отдельных дикторов различия в реализации *s* могут быть более резкими, чем между языками в целом; 3) выяснилось, что произнесения на нанайском и чукотском более вариативны, чем на других языках, что соотносится с объемом подсистем сибилантов выбранных языков. Полученные данные могут быть аргументом в пользу того, что в больших подсистемах единицы менее вариативны, и чем меньше подсистема, тем больше вариативность входящих в нее единиц.

Ключевые слова

акустическая вариативность, сибиланты, метод главных компонент, фонетическая типология, консонантизм

Благодарности

Авторы признательны редакции журнала и двум рецензентам за внимание к нашему исследованию и полезные замечания. И. А. Зибер работала над статьей в ходе проведения исследования в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики” (НИУ ВШЭ)» в 2017–2018 гг. (№ 17-05-0043) и в рамках государственной поддержки ведущих университетов России «5-100»

Для цитирования

Зибер И. А., Мороз Г. А. Исследование акустической вариативности *s* методом главных компонент // Вестник НГУ. Серия: Лингвистика и межкультурная коммуникация. 2019. Т. 17, № 1. С. 49–64. DOI 10.25205/1818-7935-2019-17-1-49-64

Estimating the Acoustic Variation of *s* via Principal Component Analysis

Inna A. Sieber, George A. Moroz

*National Research University Higher School of Economics
Moscow, Russian Federation*

Abstract

Articulatory and acoustic variation has recently become one of the most prominent spheres in phonetics. The acoustics of fricative sounds, sibilants in particular, however, is known to be very difficult to study. As far as we are concerned, no algorithm has been created yet to estimate the degree of acoustic variation of fricatives, neither between the speak-

ers of one language, nor between languages. In this article, we try to estimate the degree of acoustic variability of the alveolar sibilant *s*. We were interested in creating and evaluating algorithm for estimation interlanguage variability and make data from different languages comparable. We also were interested in estimation correlation between the phonological complexity of sibilant subsystem and variability of *s* sound. We analyze *s* in similar contexts pronounced by several female speakers of five unrelated languages of Russia: Adyghe, Nanai, Russian, Udmurt and Chukchi. All pronunciations were manually annotated, and then spectral information were automatically extracted and transformed via Linear Predicting Coding. The obtained spectral slices were analyzed and ten different features were extracted: frequency of the first peak (in Hertz and Bark), slope of the linear regression based on values from global minimum before peak (annotated manually) to peak itself, center of gravity (in Hertz and Bark), standard deviation (in Hertz and Bark), skewness and kurtosis. Since it is hard to analyze all these features separately, we used Principal Component Analysis transformation for reducing number of variables. Cumulative percentage of the dispersion explained by first and second Principal Components is equal to 65 %. At the end we show how it is possible to use obtained Principal Components for measuring variability and comparing different utterance of alveolar sibilants. As a result we achieve some goals we planned: 1) we developed the algorithm for variability analysis that could be used in any other field of acoustics; 2) our analysis shows that some speakers could be more variable then the whole languages; 3) the analysis of our data using this algorithm shows that Nanai and Chukchi is more variable comparing to other variables. This also corresponds to the least complex sibilant subsystems.

Keywords

acoustic variation, sibilants, Principal Component Analysis, phonological typology, consonants

Acknowledgements

We are very grateful to the editorial board of the Journal and two our reviewers for their attention to our study and for useful advice. Inna Sieber's work is a part of collective study (№ 17-05-0043) within a program "Scientific fund of the National Research University "Higher School of Economics" (NRU HSE)" in 2017–2018 and due to government support of the leading universities of Russia "5-100".

For citation

Sieber, Inna A., Moroz, George A. Estimating the Acoustic Variation of *s* via Principal Component Analysis. *Vestnik NSU. Series: Linguistics and Intercultural Communication*, 2019, vol. 17, no. 1, p. 49–64. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7935-2019-17-1-49-64

Введение

Открытие бесконечной вариативности звуковых единиц в речи называют одним из важнейших достижений лингвистики XX в. [Ohala, 1993]. В современной фонетической науке исследования вариативности – одна из наиболее активно развивающихся областей (см., например: отдельная глава в [The Oxford Handbook..., 2012]; специальные выпуски журналов и сборников¹; диссертации [Chodroff, 2017]). При этом до сих пор остается открытым вопрос о том, как измерить степень вариативности фонетических единиц. Кроме того, акустика фрикативных в языках народов России изучена недостаточно: со времени, когда проводилось большинство исследований акустической фонетики отдельных идиом (см. [Андреева, 1988] по эвенкийскому языку, [Асиновский, 1999; 2003] по чукотско-камчатским языкам), инструментальная фонетика сильно продвинулась вперед, а современных экспериментальных работ, посвященных отдельным подсистемам консонантизма (см. [Белова, 2000] об удмуртских аффрикатах), по-прежнему мало. В настоящей статье представлены результаты работы в обоих направлениях. В работе используются транскрипционные символы МФА в варианте 2015 г.

Сибиланты

Принято считать, что турбулентный шум фрикативных согласных образуется при прохождении воздушной струи через сужение между артикуляторами. Так образуются фрикативные несибиланты, такие как *f*, *x*, *φ*, *θ*. При произнесении сибилантов сужение в ротовой по-

¹ См., например: Variation and Gradience in Phonetics and Phonology. F. Kügler, C. Féry, R. van de Vijver (eds.). *Phonology and Phonetics* 14, A. Lahiri (ed.). Berlin, New York, Mouton de Gruyter. 2009); *Linguistics* (Berlin, De Gruyter, 2017, volume 55, issue 5: Special issue: The Sociophonetics of /s/. Guest Editors: Erez Levon, Marie Maegaard, and Nicolai Pharao).

лости увеличивает скорость воздушного потока, который при столкновении со сближенными зубами порождает специфический шум – высокочастотный и высокоинтенсивный. Согласные, фрикативные и аффрикаты, соответствующие приведенному описанию, и называются чаще всего сибилантами [Ladefoged, Maddieson, 1996. P. 138, 150]. Таковы, к примеру, *s*, *z*, *ʃ*, *ʒ*. Исследования подтверждают, что сибиланты существуют как общность в сознании наивных носителей разных языков – говорящие склонны группировать соответствующие буквы и звуки [Nartey, 1982. P. 13].

Вариативность

В отличие от многих типов звуков для сибилантов чрезвычайно трудно выделить такие акустические параметры, которые надежно отличали бы их друг от друга на уровне языка [Newman et al., 2001; Haley et al., 2010]. Кроме того, иногда сделать обобщения о качестве *s* в языке оказывается невозможным, потому что данные носителей слишком различаются [Gordon et al., 2002]. В лингвистической среде даже возникло мнение, что для сибилантов вовсе невозможно выделить акустический инвариант, а есть только относительное расположение на спектральной картине (см. обзор: [Haley et al., 2010]).

Известны различия и в том, как реализуются сибиланты одного места и способа образования (в частности, *s*) в разных языках [Heffeman, 2004; Li et al., 2007; Fuchs, Toda, 2010]. Межъязыковая вариативность в реализации сибилантов, особенно альвеолярного, лучше всего отражена в исследованиях на материале многих языков, принадлежащих разным ареалам и языковым семьям. Это, главным образом, [Gordon et al., 2002] (семь языков) и [Nartey, 1982] (14 языков). Впечатляющая межъязыковая вариативность альвеолярного сибиланта демонстрирует те широчайшие артикуляционные возможности, которыми он располагает и многими из которых пользуется, по-видимому, в каждом языке. Что же вызывает столь сильную вариативность *s* и других сибилантов, проявляющуюся даже в одном языке в одной и той же позиции? В каких условиях она обнаруживается?

Частично причины вариативности кроются в физиологии. На артикуляцию *s* влияют вид прикуса говорящего, взаимное расположение верхних зубов и нижней челюсти, величина альвеолярного бугра, размеры и форма языка, резцов, всей ротовой полости [Ladefoged, Maddieson, 1996. С. 146. Chodroff, 2017. С. 110]. С учетом множества параметров говорящий находит ту конфигурацию, которая позволяет достигать необходимого акустического эффекта [McCutcheon et al., 1980].

Частично вариативность формируют социолингвистические параметры, такие как пол или гендер говорящего (подробный обзор см. в статье [Fuchs, Toda, 2010] и в сборнике «Linguistics» (2017)), сексуальная ориентация [Munson et al., 2006; Campbell-Kibler, 2011], возраст, социально-экономические характеристики [Levon, Holmes-Elliott, 2013; Podesva, Van Hofwegen, 2014].

Значительная доля вариативности, конечно же, обусловлена собственно языковыми процессами и явлениями. Наибольшее влияние на звук оказывает ближайший фонетический контекст, прежде всего последующий гласный ([Hughes, Halle, 1956; Lindblad, 1980; Shadle, Scully, 1995]). Отмечается, что коартикуляция гласному альвеолярных фрикативных типа *s* сильнее, чем постальвеолярных типа *ʃ* [Nittrouer et al., 1989; Tabain, 2001]. Сообщается о влиянии на качество сибиланта слоговой позиции [Silbert, de Jong, 2008], стиля произнесения [Maniwa et al., 2009] и др.

Очень важным представляется вопрос о том, какую роль в формировании вариативности играет фонологическая система языка. Тогда как гласные звуки при заполнении вокалического пространства стремятся сохранять максимальные дистанции, не похоже, чтобы организация систем согласных происходила так же – при этом перцептивная дифференциация, несомненно, имеет значение для этого процесса [Lindblom, Maddieson, 1988]. Каково это значение, не совсем понятно. В старых грамматиках можно найти утверждение о том, что «об-

щевропейское современное *s* стало таким острым благодаря развившемуся наряду с ним звуку *sch* (*ʃ*) [Rapp, 1855], иными словами, что «фонологическая оппозиция имеет следствием более четкие акустико-артикуляционные различия» [Гордина, 2006. С. 256]. Современные лингвисты высказываются более осторожно, однако подтверждения этому можно найти в имеющихся типологических данных. Так, в английском языке, где имеется два артикуляционных жеста для фрикативных сибилантов, альвеолярные согласные свободно варьируют положение кончика языка – они бывают апикальными и ламинальными и разделяют говорящих примерно поровну [Bladon, Nolan, 1977; Dart, 1991]. В то же время в языке тода, имеющем четыре артикуляционных жеста для сибилантов, положение кончика языка помогает различать согласные смежных мест образования, и альвеолярный сибилант всегда реализуется как ламинальный [Ladefoged, Maddieson, 1996; Gordon et al., 2002]. Противоположный полюс иллюстрирует гавайский язык (восемь согласных), в котором отмечается свободная вариативность *t* и *k*, но в условиях ограниченного инвентаря: по сути, любой фрикативный и любая аффриката, а также любой не губной и не гортанный взрывной могут функционировать как *k* [Schütz, 1994]. Таким образом, мы видим более высокую вариативность единиц там, где их число меньше, а потому не можем исключать того, что система, различающая большее число единиц внутри некоторого класса, будет накладывать более сильные ограничения на произношение этих единиц, как это происходит в тода.

Вопросы

Несмотря на то что на сегодняшний день обнаружены и описаны многочисленные факторы и параметры вариативности фрикативных, сибилантов, и альвеолярных сибилантов в частности, никто, насколько нам известно, не предпринимал попыток измерить степень этой вариативности с учетом нескольких параметров и представить ее численно. Без измерения вариативности нет возможности ни сравнить то, насколько она велика в разных фонетических контекстах, ни оценить участие многочисленных факторов, о которых говорилось выше. В первую очередь это важно выяснить для альвеолярного сибиланта, который является и самым распространенным сибилантом в языках мира, и, насколько можно судить, самым вариативным.

В цели настоящего исследования, таким образом, входил поиск ответов на следующие проблемные вопросы.

1. В равной ли степени вариативны *s* носителей одного языка?
2. В равной ли степени вариативны *s* в разных языках?
3. Зависит ли степень вариативности *s* от числа сибилантов в языке?
4. Какие акустические измерения отражают вариативность?
5. Как измерить и сравнить степень вариативности?

Исходные данные

Исследование проводилось на материале пяти неродственных языков народов России: адыгейского (абхазо-адыгские, Адыгея и Краснодарский край), удмуртского (уральские, Удмуртия), нанайского (тунгусо-маньчжурские, Хабаровский край и Приморский край), русского (индоевропейские) и чукотского (чукотско-камчатские, Чукотский АО). Говоры, выбранные для исследования, время и место записи и другая информация представлены в приложении 1.

Исследуемые языки различаются по составу подсистемы фрикативных и, в частности, подсистемы сибилантов². Поскольку в противопоставления бывают вовлечены различные

² В настоящей статье под подсистемой сибилантов имеется в виду в первую очередь подсистема фонемного инвентаря. Но поскольку в исследуемых идиомах набор звукотипов сибилантов и фонем сибилантов совпадает, а стимулы содержат /s/ в сильной позиции, для решения наших задач разделять фонетический и фонологический

признаки, формирующие в больших инвентарях серии единиц, мы учитываем в оценке объема подсистемы три числа. Первое – это абсолютное число сибилантов (например, девять в русском языке). Второе – число мест основной артикуляции (например, свистящий и шипящий ряды сибилантов в русском); третье – то же число с учетом палатализации, которая существенно влияет на место сужения в речевом тракте, так что в некоторых случаях палатализованные согласные даже могут рассматриваться в качестве отдельного локального ряда (например, для русского можно постулировать наличие свистящего, свистящего палатализованного, шипящего и шипящего палатализованного рядов сибилантов). Данные об объеме подсистем приводятся в таблице.

Объем подсистемы сибилантов в исследуемых языках
The size of sibilant subsystems in the languages under analysis³

Язык	Семья	Число сибилантов	Число мест основной артикуляции	Число мест артикуляции с учетом палатализации
Адыгейский	абхазо-адыгские	31	4	4
Нанайский	тунгусо-маньчжурские	3	2	2
Русский	индоевропейские	9	2	4
Удмуртский	уральские	8	3	3
Чукотский	чукотско-камчатские	1	1	1

Единственный сибилант, общий для всех исследуемых языков, – альвеолярный *s*, характеризующийся сужением на передней части альвеолярного бугра⁴. Он и является объектом нашего исследования.

Исследуемые идиомы имеют различную структуру слога, морфемы и слова. Для сравнения привлекались такие позиции, которые имеются и являются частотными во всех исследуемых идиомах. Таким образом, не рассматривались, в частности, геминированные произнесения типа *рассада* и словоформы с конечным *s* типа *матрас*.

В выборку были включены слова, содержащие *s* перед *a* в начале слова и в середине слова после гласного; таким образом, исследовался согласный в последовательностях *sa, asa, asa* (например, чук. *sajkok* ‘чайник’, нан. *giasa* ‘изгородь’). Были отобраны 3–5 дикторов для каждого языка, 3–4 слова от каждого диктора, 3–4 повторения каждого слова (изолированные и в рамочной фразе), итого в среднем по 12 произнесений каждого диктора. Все дикторы – женщины.

Список стимулов и число произнесений для каждого диктора приводятся в приложении 2.

уровни нет необходимости, и сибиланты-фонемы и их конкретные реализации в дальнейшем называются одинаково «сибилантами» или «единицами».

³ List of languages in lines: Adyghe, Nanai, Russian, Udmurt, Chukchi.

In columns: language family, number of sibilants, number of places of the basic articulation (regardless of additional articulations), number of places of articulation including palatalization as a separate place.

⁴ В русскоязычной традиции *s* и схожие с ним звуки других языков часто называются зубными, но в действительности очень трудно понять, является тот или иной согласный альвеолярным или зубным. Предполагается, что собственно (язычные) зубные, или дентальные, согласные в языках встречаются нечасто; таков, в частности, тогда, в котором зубной сибилант противопоставлен альвеолярному [Ladefoged, Maddieson, 1996. P. 145].

Измерения

Все произнесения были размечены вручную, измерения производились для 100 % длительности фрикативной части без учета возможных динамических изменений. Разметка и измерения выполнены в программе Praat⁵. Визуализация и анализ методом главных компонент производились с использованием языка программирования R⁶ и пакетов «ggplot2»⁷ и «lingtypology»⁸. Код, созданный для анализа и визуализации данных, доступен по адресу https://github.com/agricolamz/paper_on_fricatives.

Так как человеческое ухо по-разному оценивает высоту звука в зависимости от интенсивности на разных частотах, в исследовании мы использовали не только абсолютные значения в герцах, но и психоакустическое представление на шкале барков, предложенное в работе [Zwicker, 1961].

Поскольку спектральные характеристики звука необходимо было обрабатывать автоматически, для удобства использовалась сплайнированная огибающая, полученная методом линейного предиктивного кодирования (ЛПК, LPC, см. [Markel, Gray, 1976]). Был выбран порядок предсказания 20, при котором корректно отображаются максимумы интенсивности, выявляемые на спектральных срезах (быстрое преобразование Фурье), на самом вариативном промежутке – до 10 кГц.

Пример таких огибающих, на которых и производились все измерения, представлен на рис. 1. Это типичный спектр альвеолярного сибиланта, характеризуемый выраженным пиком в области 4–5 кГц с участками малой интенсивности до и после него. Значение первого пика может варьироваться в широком промежутке частот от 3 до 10 кГц, но именно выраженность пика обычно отличает сибиланты от несибилантов [Gordon et al., 2002]. Тем не менее, среди анализируемых произнесений есть и такие, которые характеризует плоский спектр без выраженного пика; такие произнесения воспринимаются на слух как более низкие, менее резкие и менее «компактные». Если произнесения с выраженным пиком являются прототипическими сибилантными произнесениями, то произнесения с плоским спектром – периферийные.

Использованные меры

Для количественной оценки амплитудно-частотного спектра чаще всего используются первые четыре спектральных момента: среднее, дисперсия, асимметрия и эксцесс [Forrest et al., 1988; Jongman et al., 2000]. Средняя частота спектра в герцах, взвешенная по амплитуде, или *спектральный центр масс*, – самая часто используемая статистическая мера [Gordon et al., 2002; Heffeman, 2004; Jones, McDougall, 2009; Haley, 2010].

Стандартное отклонение – это еще одно измерение, которое мы производили для каждой спектральной огибающей. Вместе со спектральным центром масс эта мера, как показали исследования (в частности, [Haley, 2010]), полнее характеризует распределение, показывая рассеивание наблюдаемых значений.

Коэффициент асимметрии (“skewness”) отражает то, насколько нормально распределена спектральная энергия: сдвиг в сторону 0 Гц от среднего дает отрицательное значение [Jones, McDougall, 2009]. Эта мера часто используется наряду с другими спектральными моментами (см., например: [Forrest et al., 1988; Jongman et al., 2000]). Предполагается, что все они так или иначе коррелируют с местом образования шумных согласных [Chodroff, 2017. P. 106] и эффективно различают разные фрикативные, причем наилучшие результаты дают спектральное среднее и асимметрия [Haley et al., 2010].

⁵ Boersma P., Weenink D. Praat: doing phonetics by computer [Computer program]. Версия 6.0.37. URL: <http://www.praat.org/>. 2018.

⁶ R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>. 2018.

⁷ Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York, Springer-Verlag, 2009.

⁸ Moroz G. Lingtypology: easy mapping for Linguistic Typology. 2017. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=lingtypology>.

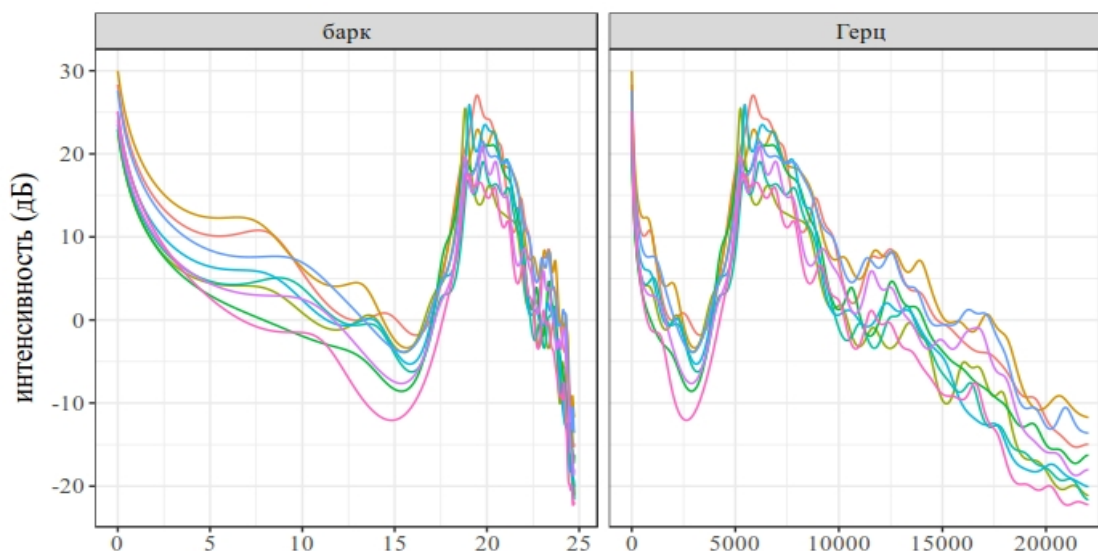


Рис. 1. Спектральные огибающие (ЛПК) в барках (слева) и в герцах (справа) для восьми произнесений; одна линия – одно произнесение. Нанайский язык, диктор – женщина. Предусиление частот до 50 Гц. Порядок предсказания 20

Fig. 1. Spectral slices (LPC) in barks (left, at the x-axis) and Herz (right, at the x-axis) for eight utterances; each line for an utterance. Intensity is at the y-axis. A female speaker for Nanai. Pre-emphasizing from 50 Hz. Number of peaks – 20

Коэффициент эксцесса (“kurtosis”) показывает степень выраженности пика спектральной огибающей, ее форму [Jones, McDougall, 2009] и используется наряду с другими спектральными моментами [Forrest et al., 1988; Jongman et al., 2000].

Поскольку частота первого пика сильно влияет на воспринимаемую высоту звука, мы включили ее в наши измерения. Автоматическое выделение максимумов производилось в пределах частотных промежутков, которые задавались вручную.

Так как в наших данных мы обнаружили как типичный для *s* частотный пик в промежутке 4–5 кГц, так и его отсутствие, мы решили измерить крутизну подъема огибающей. Для этого мы вычисляли локальный минимум перед пиком, строили линейную регрессию на всех точках от локального минимума до локального максимума, а потом брали из получившейся регрессионной формулы угловой коэффициент.

Результаты измерений

В ходе исследования использовались десять переменных: частота первого пика (в герцах и барках), угловой коэффициент (в герцах и барках), спектральный центр масс (в герцах и барках), стандартное отклонение (в герцах и барках), коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса. Когда они используются по одной, результаты измерений удобно сравнивать между собой, но они не могут дать ответа на наши вопросы, так как отражают только отдельные грани акустической картины, каждая из которых не может считаться значимой без участия остальных. При этом громоздкие графики, которые можно получить для каждого типа измерения, не дают никакой возможности сравнивать одновременно несколько переменных, а именно это входит в наши задачи.

Чтобы анализировать сразу несколько переменных, мы решили использовать один из методов уменьшения размерностей.

Методы уменьшения размерностей

Все полученные переменные – числовые, так что к ним можно применять метод главных компонент (МГК, PCA, см., например, [Husson et al., 2017]). В результате работы данного алгоритма ищется такое линейное преобразование n -мерного пространства в другое n -мерное пространство, которое минимизирует корреляцию между отдельными переменными. В результате получается новое n -мерное пространство, которое описывается n компонентами. Компоненты упорядочены на основании доли дисперсии изначальных данных, которую каждая из компонент объясняет. Благодаря этому часть получившихся компонент с высоким порядком можно не рассматривать, так как они в сумме объясняют малое количество дисперсии. Достаточными обычно признаются две-три первые компоненты, они и организуют новое пространство, которое отражает максимум дисперсии и вместе с тем удобно для визуализации и анализа.

Мы применили метод главных компонент (МГК) к трем разным наборам переменных: отдельно к переменным в барках, переменным в герцах и всем переменным вместе. Перед применением МГК все переменные были нормализованы (z -нормализация), для того чтобы единицы, в которых измеряются значения каждой из переменных, были сопоставимы.

Если использовать все переменные, две первые компоненты объясняют 60 % дисперсии, если только барковые – 65 %, если только герцевые – 63 %. Мы приняли решение использовать для визуализации две первые компоненты (ГК1 и ГК2). Так как доля дисперсии, объясненной двумя компонентами, выше всего в барковых переменных, мы будем использовать только барковый вариант.

Доля объясненной дисперсии, которая приходится на каждую из компонент, полученных в ходе применения МГК к нашим данным, представлены на рис. 2.

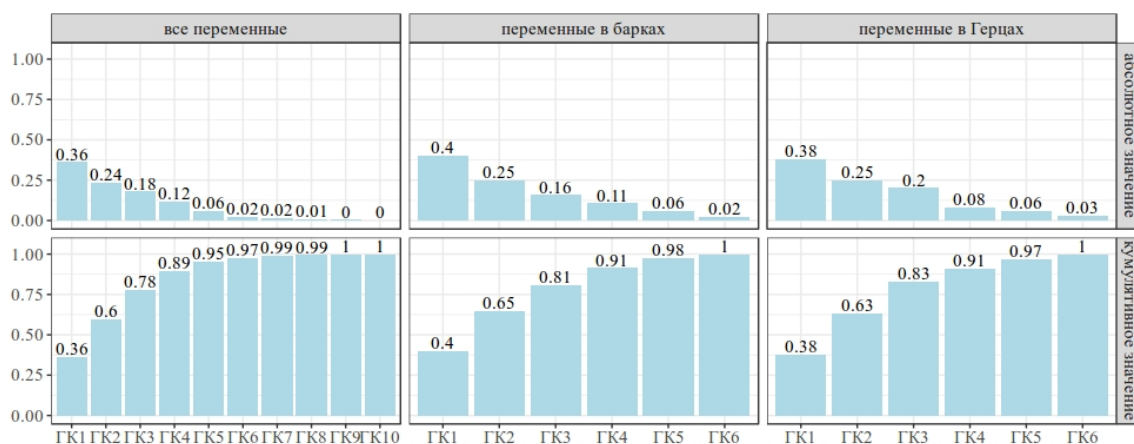


Рис. 2. Доля объясненной дисперсии всех измерений, измерений в барках и в герцах: для каждой компоненты по отдельности (вверху) и кумулятивная (внизу)

Fig. 2. Impact of each PC (Rus. ГК1, ГК2 etc.) in different models: for all variables (right), bark variables (center) and Hertz variables there are cumulative proportion (above) and proportion of variance (below)

На рис. 3 изображены все наблюдения в новой системе координат, где ось ординат представляет собой первую главную компоненту (ГК1), а ось абсцисс – вторую (ГК2). Каждой точке соответствует одно произнесение одного диктора, транспонированное в новое про-

странство. Координаты каждой точки обусловлены одновременно всеми измерениями в барках: спектральным центром масс, стандартным отклонением, коэффициентами асимметрии и эксцесса, частотой первого пика и угловым коэффициентом. Оси, соответствующие этим измерениям и транспонированные в новую систему координат, на рис. 3 обозначены черными стрелками с соответствующими подписями. Чем меньше угол между двумя стрелками, тем больше они скоррелированы по сравнению с остальными переменными; если угол превышает 90° , то коэффициент корреляции будет отрицательным. На рис. 3 мы видим, что такие сильно скоррелированные переменные – коэффициент асимметрии и центр масс ($r = -0,84$), стандартное отклонение и коэффициент эксцесса ($r = -0,52$). Овалы представляют собой доверительные эллипсы для каждого языка (алгоритм расчета см. в [Fox, Weisberg, 2011]). Мы видим, что доверительный эллипс для нанайского имеет большую площадь в сравнении с другими, т. е., предположительно, отражает большую вариативность *s*.

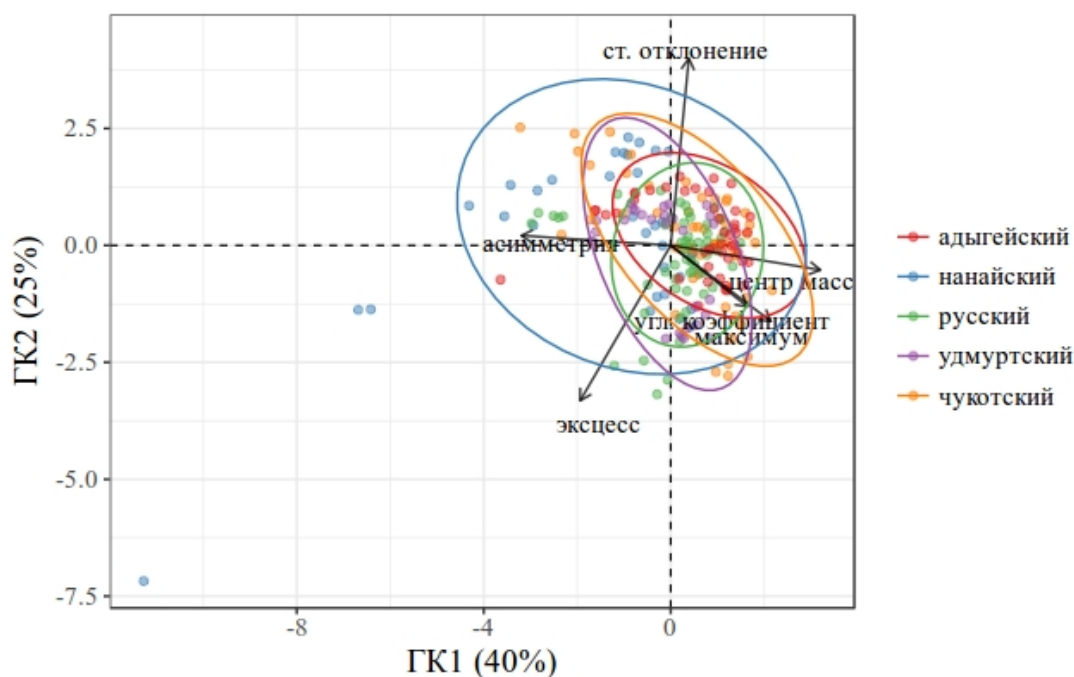


Рис. 3. Наблюдаемые значения и переменные в пространстве первых двух компонент.

Точки – произнесения каждого языка обведены доверительным эллипсом

Fig. 3. PCA (PC 1 and PC 2) with bark variables from the top clockwise: standard deviation, center of gravity, spectral slope, kurtosis, scewness. A point for each [s] utterance, an ellipse for each language: red for Adyghe, blue for Nanai, green for Russian, purple for Udmurt, orange for Chukchi

Чтобы количественно измерить степень вариативности сибиланта в выбранных нами языках, мы решили найти центроиды для каждого из них. В новом пространстве мы нашли точку, расстояния до которой от всех наблюдений по одному языку будет наименьшим. После этого мы измерили среднее расстояние от наблюдаемых точек до данного центроида. Полученные значения являются усредненными значениями евклидова расстояния между точками в новом пространстве, полученном после нормализации переменных и применения МГК. Результаты можно увидеть на рис. 4. На графике также приводятся среднее и стандартное отклонение расстояний для центроида каждого языка.

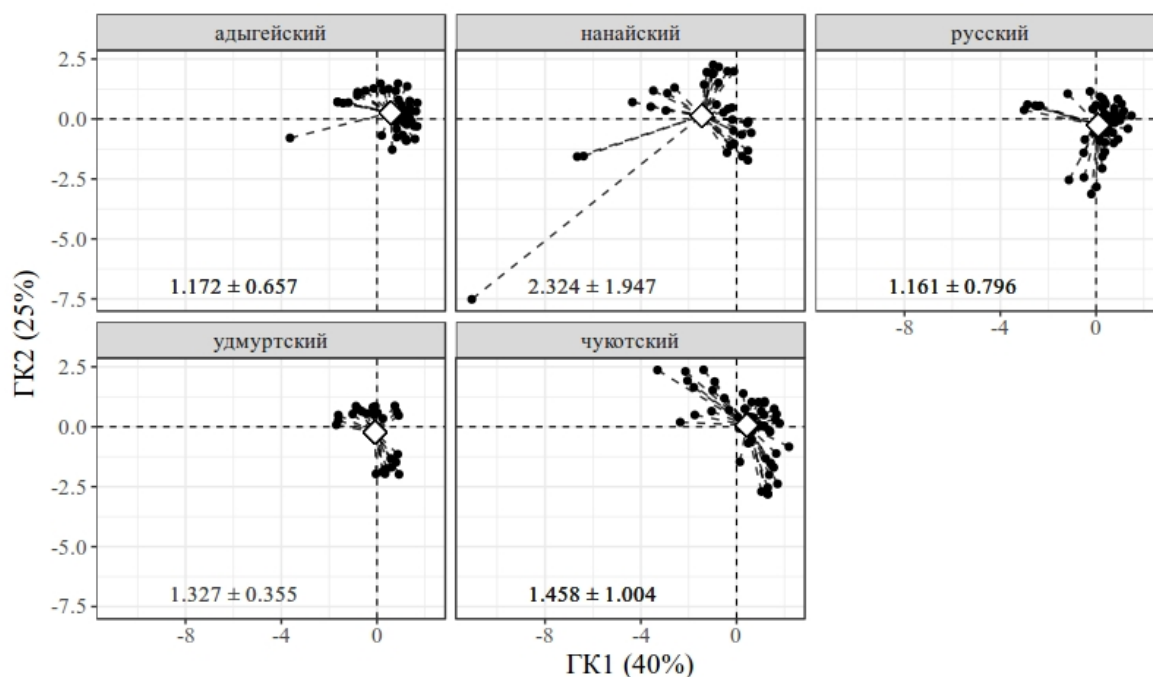


Рис. 4. Наблюдаемые значения, центры (обозначены ромбом) для каждого языка и расстояния до них в пространстве первых двух главных компонент (ГК1 и ГК2). Внизу подписаны среднее и стандартное отклонение расстояния до центра для каждого из языков

Fig. 4. PCA (PC 1 and PC 2) with bark variables, from top left: Adyghe, Nanai, Russian, Udmurt, Chukchi.

A point for each utterance, a rhombus marks a centroid. For each language mean distance from the centroid to the utterances and standard deviation of the distance are estimated

Стандартное отклонение в данном случае иллюстрирует то, насколько сильно наблюдения отклоняются от среднего. Так, если стандартное отклонение достаточно велико, значит, можно подозревать в наших данных выбросы – наблюдения, сильно отличающиеся от основной выборки. Меньшее стандартное отклонение сигнализирует более равномерное распределение вокруг центра.

Интерпретация результатов

Языки с наибольшим средним расстоянием до центра – нанайский и чукотский. Как видно из графиков и значений стандартного отклонения, своим первенством эти языки – и особенно нанайский – во многом обязаны отдельным произнесениям, которые отличаются от остальных. Мы видим такие произнесения во всех языках, кроме удмуртского, но у нанайского и чукотского их больше всего. По-видимому, это важная особенность структуры вариативности s в этих языках.

Структура вариативности в русском и адыгейском языках в целом сходная. Часть значений расположена компактно, при этом присутствуют отдельные выбросы. В русском таких выбросов значительно больше, чем в адыгейском, что видно на графике и отражено в значениях стандартного отклонения, которое для русского языка выше. Таким образом, хотя среднее расстояние примерно равно для русского и адыгейского (у адыгейского даже выше

на 1 %), высокое значение стандартного отклонения для русского языка вкупе с формой графиков дает основания говорить о том, что русский *s* более вариативен, чем адыгейский.

На графике произнесений для удмуртского языка видно, что точки-значения формируют две компактные группы, не сообщающиеся между собой (см. рис. 4). Такую картину может давать контекстное распределение двух типов реализаций, но в данном случае, как представляется, дело именно в вариативности между дикторами. Это заметно по отдельным измерениям. В частности, значения спектрального центра масс у половины удмуртских дикторов расположены в широком промежутке до 4 кГц, тогда как у другой половины все они выше 5 кГц и даже 5,5 кГц. Такой картины в остальных языках мы не наблюдаем. Можно сказать, что для удмуртского языка с его компактным расположением значений различия между говорящими играет ключевую роль в формировании структуры вариативности.

Таким образом, на основании среднего расстояния до центроида и с учетом стандартного отклонения можно, имея в виду сделанные выше оговорки, выстроить языки в следующем порядке от наиболее вариативного до наименее вариативного *s*: нанайский – чукотский – удмуртский – русский – адыгейский.

Сопоставим с полученным порядком данные об инвентаре сибилантов в этих языках. Поскольку подсистемы сибилантов в языках устроены по-разному, место в иерархии объема подсистем может зависеть от способа его оценки. Число мест основной артикуляции (в скобках), вопреки ожиданиям, не повторяет порядка нашей иерархии степени вариативности: нанайский (2) – чукотский (1) – удмуртский (3) – русский (2) – адыгейский (4).

Ближе к этому порядку подходит оценка числа мест образования, учитывающая палатализованные согласные и корректирующая место русского языка: нанайский (2) – чукотский (1) – удмуртский (3) – русский (4) – адыгейский (4).

В целом соответствует иерархии степени вариативности абсолютное число сибилантов: нанайский (3) – чукотский (1) – удмуртский (8) – русский (9) – адыгейский (31).

Сопоставление иерархии вариативности и объема подсистем сибилантов для языков не дает однозначного ответа на вопрос, какой из параметров инвентаря влияет на степень вариативности больше всего, но показывает некоторые закономерности. С одной стороны, мы видим, что самыми вариативными оказываются нанайские и чукотские согласные. Нанайский и чукотский имеют меньше всего сибилантов по всем трем оценкам, что особенно заметно по абсолютному числу, которое различается в разы (три нанайских сибиланта и один чукотский против восьми в удмуртском, девяти в русском и 31 в адыгейском). С другой стороны, адыгейский, который мы признали наименее вариативным, по всем оценкам имеет больше всего сибилантов. Это дает основания полагать, что, действительно, существует связь между объемом подсистемы сибилантов и степенью вариативности *s* в языке.

В то же время интерпретация данных русского языка неоднозначна. Причина этого в дополнительной артикуляции палатализации, которая наличествует и имеет функциональную нагрузку в русском, но отсутствует в остальных исследуемых языках. Дело в том, что палатализация оказывает большое влияние на место основного сужения язычных согласных. Для палатализованных постальвеолярных согласных (или альвеоло-палатальных) даже приняты отдельные символы в Международном фонетическом алфавите (ϵz). В лингвистической литературе ведутся споры о том, стоит ли считать альвеоло-палатальные согласные палатализованными постальвеолярными или же они имеют свое особое основное место образования (ср. МФА 2005 г.). Для палатализованных альвеолярных согласных этот вопрос не стоит так остро, но некоторые лингвисты утверждают, что русские *s* и *s'* отличаются друг от друга не меньше, а то и больше, чем *f* и ϵ (С. В. Князев, личное сообщение), таким образом, расщеплять альвеолярное место образования имеет столько же смысла, сколько постальвеолярное. Оказывается, что в зависимости от того, как оценивается объем подсистемы сибилантов, русский язык по числу мест образования может приравниваться к нанайскому, где сибилантов втрое меньше (в обоих выделяются свистящие и шипящие), адыгейскому, где их втрое больше (в обоих можно выделить четыре целевые артикуляции для фрикативных) или бе-

сермянскому, где их почти столько же (если принимать альвеоло-палатальные согласные за отдельный локальный ряд и учитывать бесермянские «шепелявые» и русские альвеоло-палатальные одинаково). При этом по совокупности признаков сибилантов, да и по абсолютному числу сибилантов, русская подсистема является несколько более дробной, чем бесермянская, и может, таким образом, занимать то же место в иерархии объема подсистем, какое она занимает в иерархии степени вариативности.

Таким образом, наши результаты могут быть некоторым аргументом в пользу того, что степень вариативности зависит от объема подсистемы. Это требует дальнейшей проверки на большем материале.

В предыдущих разделах мы продемонстрировали алгоритм оценки вариативности произнесения *s* в разных языках. Преимуществом предложенного метода является наглядная визуализация, которая позволяет отобразить с некоторой потерей данные по десяти переменным по любому числу языков. Более того, данный метод вовсе не ограничен исключительно сибилантом *s*, а может быть распространен и на другие фрикативные. Важно подчеркнуть, что наш подход позволяет использовать и большее число переменных, не ограничивая исследования каким-то определенным набором признаков. Так, во многих работах исследователи пытаются найти одну или две переменные, которые позволили бы им различать те или иные типы сибилантов, тогда как наш подход позволяет использовать столько переменных, сколько представляется необходимым.

Недостатком нашего метода является неоднозначность интерпретаций самих компонент. Для настоящего исследования было важно унифицировать число произнесений, повторений и дикторов, записанных в полевых условиях, поэтому общее количество данных неизбежно было небольшим. Любые новые данные могут изменить картину. Кроме того, если другой исследователь приложит метод к своим данным, он также может получить совсем другие компоненты.

Заключение

В нашей работе мы попытались количественно оценить вариативность произношения *s* в адыгейском, нанайском, русском, удмуртском и чукотском языках. Наши данные позволяют нам ответить на поставленные вопросы следующим образом.

1. Альвеолярный сибилант носителей одного языка может быть вариативен в разной степени. Некоторым дикторам свойственна большая вариативность произнесений *s*, чем другим дикторам – носителям того же языка, и даже целым языкам.

2. В разных языках *s* вариативен в разной степени. Из пяти исследуемых языков наиболее вариативными по итогам применения нашего метода оказались нанайский и чукотский, а наименее вариативным – адыгейский.

3. Наши результаты могут быть аргументом в пользу того, что структура фонетической системы и ее подсистем, в частности абсолютное число сибилантов, влияет на степень артикуляционной и акустической вариативности отдельных единиц. Вариативность альвеолярного сибиланта выше в тех фонетических системах, где мало сибилантов, и ниже в тех системах, где системы сибилантов богаче. Этот вопрос, тем не менее, требует дальнейшего изучения.

4. Мы оценивали произнесения при помощи следующих измерений: частота первого пика (в герцах и барках), угловой коэффициент (в герцах и барках), спектральный центр масс (в герцах и барках), стандартное отклонение (в герцах и барках), коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса. Вариативность эффективно отражают все выбранные нами меры.

5. Измерения производились автоматически, после чего анализировались методом главных компонент, который позволил расположить их все на новой двумерной плоскости. Максимально информативной оказалась модель, где использовались лишь барковые переменные. В новом пространстве мы нашли центроид для каждого языка и оценили расстояние от всех

наблюдаемых произнесений до языкового центроида. Среднее и стандартное отклонение расстояний от наблюдаемых значений до центроида позволили оценить вариативность произношения в каждом языке и сравнить по этим параметрам все языки.

Список литературы / References

- Андреева Т. Е.** Звуковой строй томмотского говора эвенкийского языка. Экспериментально-фонетические исследования. Новосибирск: Наука, 1988.
Andreeva, T. E. The sound system of Tommot Evenki. Experimental phonetic studies. Novosibirsk, Nauka, 1988. (in Russ.)
- Асиновский А. С.** Консонантизм чукотского языка (на основе экспериментально-фонетических данных). Л.: Наука, 1991.
Asinovskij, A. S. The consonantal system of Chukchi (based on experimental data). Leningrad, Nauka, 1991. (in Russ.)
- Асиновский А. С.** Сопоставительная фонетика чукотско-камчатских языков: Дис. ... д-ра филол. наук: 10.02.02. Санкт-Петербург, 2003.
Asinovskij, A. S. Comparative phonetics of the Chukotko-Kamchatkan languages. Doctoral dissertation. St. Petersburg, 2003. (in Russ.)
- Белова Е. Б.** Аффрикаты удмуртского языка в экспериментальном освещении: Дис. ... канд. филол. наук: 10.02.07. Ижевск, 2000.
Belova, E. B. Udmurt affricates in the experimental study. PhD thesis. Izhevsk, 2000. (in Russ.)
- Гордина М. В.** История фонетических исследований (от античности до возникновения фонологической теории). СПб.: Филологический факультет СПбГУ, 2006.
Gordina, M. V. The history of phonetic research (from antiquity to the rise of phonological theory). St. Petersburg, The faculty of philology, Saint Petersburg State University, 2006. (in Russ.)
- Bladon, R. A. W., Nolan, F.** A videofluorographic investigation of tip and blade alveolars in English. *Journal of Phonetics*, 1977, no. 5, p. 185–93.
- Campbell-Kibler, K.** Intersecting variables and perceived sexual orientation in men. *American Speech*, 2011, vol. 86 (1), p. 52–68.
- Chordoff, E. R.** Structured variation in obstruent production and perception. A PhD dissertation. Baltimore, Maryland, 2017, 281 p.
- Dart, S.** Articulatory and Acoustic Properties of Apical and Laminal Articulations. *UCLA Working Papers in Phonetics*, 1991, no. 79, p. 1–155.
- Forrest, K., Weismer, G., Milenkovic, P., Dougall, R. N.** Statistical analysis of word-initial voiceless obstruents: preliminary data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, vol. 84 (1), p. 115–123.
- Fox, J., Weisberg, S.** An R Companion to Applied Regression. Second Edition. Thousand Oaks CA: Sage, 2011. URL: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>.
- Fuchs, S., Toda, M.** Do differences in male versus female /s/ reflect biological or sociophonetic factors? In: *Turbulent Sounds. An Interdisciplinary Guide*, 2010, p. 281–302.
- Gordon, M., Barthmaier, P., Sands, K.** A cross-linguistic acoustic study of voiceless fricatives. *Journal of International Phonetic Association*, 2002, no. 32, p. 141–174.
- Haley, K. L., Seelinger, E., Mandulak, K. C., Zajac, D. J.** Evaluating the spectral distinction between sibilant fricatives through a speaker-centered approach. *Journal of Phonetics*, 2010, vol. 38 (4), p. 548–554.
- Heffeman, K.** Evidence from HNR that /s/ is a social marker of gender. *Toronto Working Papers in Linguistics*, 2004, vol. 23 (2), p. 71–84.
- Hughes, G. W., Halle, M.** Spectral properties of fricative consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, vol. 28 (2), p. 303–310.

- Husson, F., Lê, S., Pagès, J.** Exploratory multivariate analysis by example using R. Chapman and Hall/CRC, 2017.
- Jones, M. J., McDougall, K.** The Acoustic Character of Fricated /t/ in Australian English: A Comparison with /s/ and /esh/. *Journal of the International Phonetic Association*, 2009, vol. 39.3, p. 265–289.
- Jongman, A., Wayland, R., Wong, S.** Acoustic characteristics of English fricatives. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, vol. 108 (3), p. 1252–1263.
- Ladefoged, P., Maddieson, I.** The Sounds of the World's Languages. Blackwell, 1996, 414 p.
- Levon, E., Holmes-Elliott, S.** East end boys and west end girls: /s/-fronting in Southeast England. *University of Pennsylvania Working Papers in Linguistics*, 2013, vol. 19 (2), p. 111–120.
- Li, F. F., Edwards, J., Beckman, M.** Spectral Measures for Sibilant Fricatives of English, Japanese and Mandarin Chinese. In: Proceedings of the 16th International Congress of Phonetic Sciences, 6–10 August 2007. Saarbrücken, Germany. 2007, p. 917–920.
- Lindblad, P.** Svenskans sje- och tje-ljud i ett Allmänfonetisk Perspektiv. Lund, C. W. K. Gleerup, 1980.
- Lindblom, B., Maddieson, I.** Phonetic Universals in Consonant Systems. In: Li, C., Hyman, L. M. (eds.). Language, Speech and Mind. London, Routledge, 1988, p. 62–78.
- Maniwa, K., Jongman, A., Wade, T.** Acoustic characteristics of clearly spoken English fricatives. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, vol. 125 (6), p. 3962–3973.
- Markel, J. D., Gray, A. J.** Linear prediction of speech. Berlin, Springer-Verlag, 1976.
- McCutcheon, M. J., Hasegawa, A., Fletcher, S. G.** Effects of palatal morphology on /s, z/ articulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, vol. 67 (S1), p. S94–S94.
- Munson, B., Jefferson, S. V., McDonald, E. C.** The influence of perceived sexual orientation on fricative identification. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, vol. 119 (4), p. 2427–2437.
- Nartey, J. N. A.** On Fricative Phones and Phonemes. PhD Dissertation. UCLA, 1982, 192 p.
- Newman, R. S., Clouse, S. A., Burnham, J. L.** The perceptual consequences of within-talker variability in fricative production. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, vol. 109 (3), p. 1181–1196.
- Nittrouer, S., Studdert-Kennedy, M., McGowan, R. S.** The emergence of phonetic segments: Evidence from the spectral structure of fricative-vowel syllables spoken by children and adults. *Journal of Speech and Hearing Research*, 1989, vol. 32 (1), p. 120–132.
- Ohala, J. J.** The phonetics of sound change. In: Historical linguistics: Problems and perspectives. Ed. by C. Jones. London, New York, Longman, 1993, p. 237–278.
- Podesva, R. J., Van Hofwegen, J.** How conservatism and normative gender constrain variation in inland California: The case of /s/. *University of Pennsylvania Working Papers in Linguistics*, 2014, vol. 20 (2), p. 128–137.
- Rapp, K. M.** Vergleichende Grammatik als Naturwissenschaft. Stuttgart, Tübingen, 1855.
- Schütz, A. J.** The Voices of Eden: A History of Hawaiian Language Studies. Honolulu, University of Hawai'i Press, 1994.
- Shadle, C. H., Scully, C.** An articulatory-acoustic-aerodynamic analysis of [s] in VCV sequences. *Journal of Phonetics*, 1995, vol. 23 (1), p. 53–66.
- Silbert, N., de Jong, K.** Focus, prosodic context, and phonological feature specification: Patterns of variation in fricative production. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, vol. 123 (5), p. 2769–2779.

- Tabain, M.** Variability in fricative production and spectra: Implications for the hyper- and hypo- and quantal theories of speech production. *Language and Speech*, 2001, vol. 44 (3), p. 57–94.
- The Oxford Handbook of Laboratory Phonology. Eds. A. C. Cohn, C. Fougeron, M. K. Huffman. Oxford University Press, 2012.
- Zwicker, E.** Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1961, vol. 33 (2), p. 248–248.

*Приложение 1
Supplement 1*

В таблице приводится основная информация об исследуемых аудиозаписях.
The following table contains information on the audio recordings under study.

Язык	Диалект	Сведения о проведении аудиозаписи		
		место	год	исследователь
Адыгейский	бжедугский	аул Нешукай, Теучежский р-н, Адыгея	2014	Г. Мороз
Нанайский		с. Джуен, Амурский р-н, Хабаровский край	2013	
Русский	литературный, младшая норма	г. Москва	2017	И. Зибер, О. Волков, Г. Мороз
Удмуртский	бесермянский	д. Шамардан, Юкаменский р-н, Удмуртия	2010–2016	коллектив исследователей из МГУ и НИУ ВШЭ
Чукотский		с. Амгуэма, Иультинский р-н; г. Анадырь, Чукотский АО	2016–2017	

*Приложение 2
Supplement 2*

В таблице представлены стимулы на пяти языках с переводом и указанием числа произнесений для каждого из дикторов. Дикторы анонимны и пронумерованы от одного до пяти для каждого языка. Если использовались произнесения трех или четырех дикторов, в графах для остальных дикторов стоит отметка «нет». Если слово не записано от некоторого диктора, в соответствующей графе стоит «0».

The table contains stimuli in five languages with translation to Russian and the number of utterances for each speaker (speaker 1 is “Д. 1” etc.).

Язык	Стимул	Перевод	Д. 1	Д. 2	Д. 3	Д. 4	Д. 5
Адыгейский	sabəj	ребенок	4	4	4	нет	нет
	sapə	пыль	4	4	4	нет	нет
	ħjəsap	математика	4	4	4	нет	нет
Нанайский	qiasa	изгородь	3	3	3	3	3
	sajna	наверное	0	3	3	3	3
	sain	отметина	0	3	3	0	0
	saji	отметина	0	0	0	0	3
	sajrakta	бусинка	0	0	0	0	3

Окончание таблицы

Язык	Стимул	Перевод	Д. 1	Д. 2	Д. 3	Д. 4	Д. 5
Русский	сахар		4	4	4	4	4
	коса		4	4	4	4	4
	осанка		4	4	4	4	4
Удмуртский	sajkanə	протрезветь	3	0	0	3	нет
	sajkaz	протрезвел	0	0	0	3	нет
	sajkatəpə	заставить протрезветь	0	3	0	0	нет
	sajkət	ясный, светлый	3	0	0	3	нет
	sajkiəkəpə	очнуться, просветлеть	0	0	3	0	нет
	sajkatekəpə	очнуться, просветлеть	0	3	0	0	нет
	sajkateke	очнулся, просветлел	0	0	3	0	нет
Чукотский	nəsasəqən	вкусный	2	6	4	3	3
	sajkok	чайник	3	3	3	4	0

Материал поступил в редколлегию
Date of submission
14.10.2018

Сведения об авторах / Information about the Authors

Зибер Инна Арнольдовна, преподаватель Школы лингвистики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия)

Inna A. Sieber, National Research University Higher School of Economics (20 Myasnitskaya Str., Moscow, 101000, Russian Federation)

innasieber@gmail.com

Мороз Георгий Алексеевич, младший научный сотрудник Международной лаборатории языковой конвергенции Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия)

George A. Moroz, National Research University Higher School of Economics (20 Myasnitskaya Str., Moscow, 101000, Russian Federation)

agricolamz@gmail.com