

На правах рукописи

Григорьев Алексей Сергеевич

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧИ ДЕТЕЙ 5-16 ЛЕТ

03.03.01 – физиология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Санкт-Петербург 2018

Работа выполнена на кафедре высшей нервной деятельности и психофизиологии биологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Научный руководитель:

Ляксо Елена Евгеньевна
доктор биологических наук, профессор
профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»,
г. Санкт-Петербург

Официальные оппоненты:

Вартанян Инна Арамаисовна
доктор биологических наук,
профессор, главный научный сотрудник
лаборатории сравнительной физиологии сенсорных систем
ФГБУН «Институт эволюционной физиологии и
биохимии им. И.М. Сеченова» РАН,
г. Санкт-Петербург

Бобошко Мария Юрьевна
доктор медицинских наук,
заведующая лабораторией слуха и речи научно-исследовательского центра
ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский
университет имени академика И.П. Павлова»
Министерства здравоохранения РФ,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

**ФГБУН «Институт физиологии
им. И.П. Павлова» РАН,**
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «__» _____ 2018 года в ____ часов на заседании
Диссертационного совета Д 212.232.10 по защите диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на
базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» по
адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, ауд. 3011.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. А.М.
Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу:
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9 и на сайте Санкт-
Петербургского государственного университета по адресу:
<https://disser.spbu.ru/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/1659.html>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор биологических наук, профессор

Н.П. Алексеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Изучение формирования речи ребенка в онтогенезе является одной из актуальных задач физиологии. Сведения об изменении акустических характеристик речи детей в процессе их развития необходимы для расширения и уточнения данных возрастной физиологии (Li, 2012; Lee, Iverson, 2008; Robb et al., 1997; Lee et al., 1999; Ballard et al., 2012; Brehm et al., 2012; Lyakso et al., 2014), для возможности использования в качестве базы при изучении речевого онтогенеза при атипичном развитии.

На материале различных языков получен огромный массив данных о акустических характеристиках вокализаций младенцев (Ляксо, 1998, 1999, 2003; Новикова, Ляксо, 2004; Куликов и др., 1999; Kuhl, Meltzoff, 1996; Nathani et al., 2006) и детей раннего возраста (Ляксо и др., 2006; Liu et al., 2015); созданы корпуса речи детей (Ляксо и др., 2007; MacWhinney, 2000; Glaze et al., 1990; Nicollas et al., 2008), которые используются в клинической практике и при автоматическом распознавании речи (Fernando et al., 2016), при создании обучающих программ, и, в последние годы, - систем альтернативной коммуникации для детей с нарушением речи.

Меньше работ посвящено анализу акустических характеристик речи типично развивающихся (ТР) детей дошкольного возраста (Ляксо, Столярова, 2008; Ляксо и др., 2012; Ballard et al., 2012, Brehm et al., 2012; Lyakso et al., 2016), младших школьников и подростков (Hoit, 1990; Vorperian, Kent, 2007; Lee, Iverson, 2008; Robb et al., 1997; Harries et al., 1998; Lee et al., 1999; Markova et al., 2016). Акцент исследований смещен в сторону изучения нарушений речи детей (Вартанян и др., 2009; Vonneh, 2011; Kent, Vorperian, 2013; Fortunato-Tavares et al., 2015). На материале русского языка большее количество работ посвящено лингвистическому аспекту детской речи (Цейтлин, 2000; Елисеева 2008), сведения об акустических характеристиках речи детей немногочисленны (Столярова, 2001; Ляксо, Столярова, 2008; Куликов и др., 1999; Ляксо и др., 2004). Работами, проводимыми в группе по изучению детской речи СПбГУ,

описаны акустические характеристики вокализаций ТР младенцев (Ляксо, 1999, 2003); младенцев и детей, воспитывающихся в условиях дома ребенка и имеющих неврологические нарушения (например, Ляксо, Новикова, 1999, Новикова и др., 2005). Прослежена динамика акустических характеристик гласных в вокализациях и словах детей близнецов (Куражова, Ляксо, 2012) и одиночно рожденных детей от рождения до 7 лет (Ляксо и др., 2012), проводятся работы по сравнительному исследованию формирования речи ТР детей и детей с расстройствами аутистического спектра (Lyakso et al., 2016, 2017). Однако в этих исследованиях речь ТР детей записана при реализации определенных задач – повторении слов (Lyakso et al., 2016, 2017), в эмоциональном состоянии (Lyakso et al., 2015). Сведения о акустических характеристиках диалогической речи русскоязычных детей отсутствуют, что позволило сформулировать цель настоящего исследования.

Цель исследования

Проследить динамику временных и спектральных характеристик слов детей 5-16 лет в зависимости от пола и возраста ребенка.

Задачи исследования

1. Сравнить значения длительности, частоты основного тона и формантных характеристик гласных из слов детей 5-16 лет в зависимости от пола и возраста ребенка.
2. Определить особенности распознавания взрослыми лексического значения слов детей 5-16 лет, вырезанных из контекста фразы, в зависимости от пола и возраста ребенка.
3. Выявить связь между акустическими характеристиками слов детей – значениями частоты основного тона, длительности и значениями формант гласных и физиологическими показателями – ростом и весом ребенка.

Положения, выносимые на защиту

1. Изменение значений длительности гласных в словах детей носит нелинейный характер и снижается в словах девочек и мальчиков к 13 годам. Значения частоты основного тона значительно снижаются у девочек к 14 годам, у мальчиков к 16 годам.
2. Значения двух первых формант гласных, площадей формантных треугольников и индекса артикуляции гласных характеризуются вариативностью и нелинейным изменением в возрасте детей 5-16 лет.
3. На распознавание взрослыми лексического значения слов детей влияют характеристики длительности и интенсивность частоты основного тона ударных гласных. Значения слов девочек взрослые распознают лучше, чем значения слов мальчиков.

Научная новизна

Впервые на материале русского языка в рамках одного исследования, в стандартизированных условиях записи и анализа речи получены новые и оригинальные данные об акустических характеристиках слов детей 5-16 лет с учетом их пола и возраста:

прослежена динамика временных и частотных характеристик ударных и безударных гласных – длительности гласных и их стационарных участков, значений частоты основного тона (ЧОТ) и двух первых формант; определены площади формантных треугольников и индексы артикуляции ударных гласных – акустические параметры речи, определяющие четкость артикуляции гласных; выявлены зависимости между возрастом и полом информанта и значениями ЧОТ, формантных частот, длительностью ударных и безударных гласных в словах;

выявлены зависимости между акустическими характеристиками слов и антропометрическими показателями детей – ростом и весом.

Впервые на материале русского языка получены данные о распознавании взрослыми лексического значения слов детей 5-16 лет вне контекста фразы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость проведенного исследования заключается в расширении представлений физиологии речи и возрастной физиологии о становлении речевой функции в онтогенезе при типичном развитии ребенка.

Изучаемый в работе возрастной период - 5-16 лет, охватывает основные этапы развития ребенка – от дошкольного возраста до завершения полового созревания, что позволяет выявить особенности артикуляционных характеристик и параметров голоса от пола и возраста ребенка. Данные, полученные в ходе исследования, могут быть включены в лекционные курсы по физиологии и психофизиологии речи для студентов – биологов, филологов и психологов. Описанные в работе нормативные характеристики речи детей, в совокупности со сведениями о распознавании взрослыми лексического значения слов детей, имеют практическую значимость. Они могут служить основой для конкретных методических рекомендаций для родителей и педагогов; использоваться в сравнительных исследованиях становления разных аспектов речи при типичном и атипичном развитии ребенка (проект РФФИ 16-06-00024а «Формирование акустических и перцептивных ключей в речи нормально развивающихся детей и детей с расстройствами аутистического спектра»); при автоматическом распознавании речи детей для дальнейшего создания компьютерных обучающих программ и развивающих игр для детей.

Степень достоверности

Результаты исследования получены на профессиональном оборудовании, адаптированном в соответствии с целями исследования и спецификой изучаемых информантов, программном обеспечении, использована достаточная выборка испытуемых-информантов для получения необходимых данных. Применяемые разнообразные экспериментальные подходы и методы полностью адекватны поставленным целям и задачам исследования. Используются валидные методы статистического анализа экспериментальных данных.

Апробация результатов

Материалы диссертации представлены на VI Всероссийской конференции-школе по «Физиологии слуха и речи», посвященной памяти чл.-корр. АН СССР Г.В. Гершуни (Санкт-Петербург, 2013); конференции с международным участием «Проблемы онтолингвистики» (Санкт-Петербург, 2009, 2011, 2016); на международной конференции «SPECOM 2013», Пльзень, Чехия, 2013; на секции «Физиология речи» в рамках постоянно действующего семинара «Акустика детской речи» (Санкт-Петербург, 2014), на II Всероссийской акустической конференции (Нижний Новгород, 2017); на всероссийской конференции молодых ученых «Психология XXI века: системный подход и междисциплинарные исследования» (Санкт-Петербург, 2017); на 8 Всероссийской конференции с международным участием «Центральные механизмы речи», посвященной памяти проф. Н.Н.Трауготт, (Санкт-Петербург, 2017).

Публикации

По теме диссертации опубликована 31 печатная работа, из них – 13 статей: 8 статей – перечня ВАК, 5 статей – WOS и Scopus.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания методики исследования, результатов, их обсуждения, выводов, списка сокращений, списка литературы, приложения. Текст диссертации изложен на 139 страницах, содержит 40 рисунков, 17 таблиц. Приложения представлены на 11 страницах. Список литературы включает 177 источников, из них 125 зарубежных.

Работа поддержана персональным грантом Американского акустического общества RUX1-33053-XX-11, 2012; Именной стипендией Санкт-Петербургского Общества Естествоиспытателей им. Колосова Н.Г., 2012. Участие в качестве исполнителя в работе по грантам (руководитель Е.Е. Ляксо):

РФФИ - № 09-06-00338а, 13-06-00281а, 16-06-00024а; РГНФ - 11-06-12042в; 13-06-00041а, 17-06-00503а.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы исследования

В исследовании приняли участие 240 детей в возрасте от 5 до 16 лет (по 10 мальчиков и 10 девочек в каждом возрастном срезе). Речевой материал для детей в возрасте 5-7 лет взят из базы данных детской речи «CHILD RU» (Ляксо и др., 2007); детей в возрасте 8-16 лет - записан в средней школе имени А.С. Пушкина. Дети развивались в соответствии с возрастной нормой по заключению педиатров; не имели диагностированных нарушений слуха и речи.

Исследование одобрено Этическим Комитетом Санкт-Петербургского государственного университета.

Аудиозапись речи детей с параллельной видеорегистрацией их поведения проводили в ситуации диалога с экспериментатором с использованием стандартного набора вопросов. Количество вопросов экспериментатора варьировало в зависимости от возраста детей, стандартными для всех детей явились 9 вопросов. Такого количества оказывалось достаточно для построения диалога, в котором дети употребляли сходные (однокоренные) или одинаковые слова, что требовалось для дальнейшего сравнения акустических характеристик ударных и безударных гласных, произнесенных детьми разного возраста. Средняя продолжительность диалога составила 5 - 10 минут, при общем времени взаимодействия экспериментатора с ребенком 20-30 минут (знакомство, определение физиологических показателей, объяснение последовательности заданий, т.д.).

Записанный речевой материал организован в базу данных диалоговой речи русскоязычных детей 8-16 лет. База содержит записи диалога ребенка с экспериментатором, ранжированные по возрастам для каждого ребенка, слова

детей включенные в тестовые последовательности для перцептивного исследования, фонематическое и фонетическое описание слов.

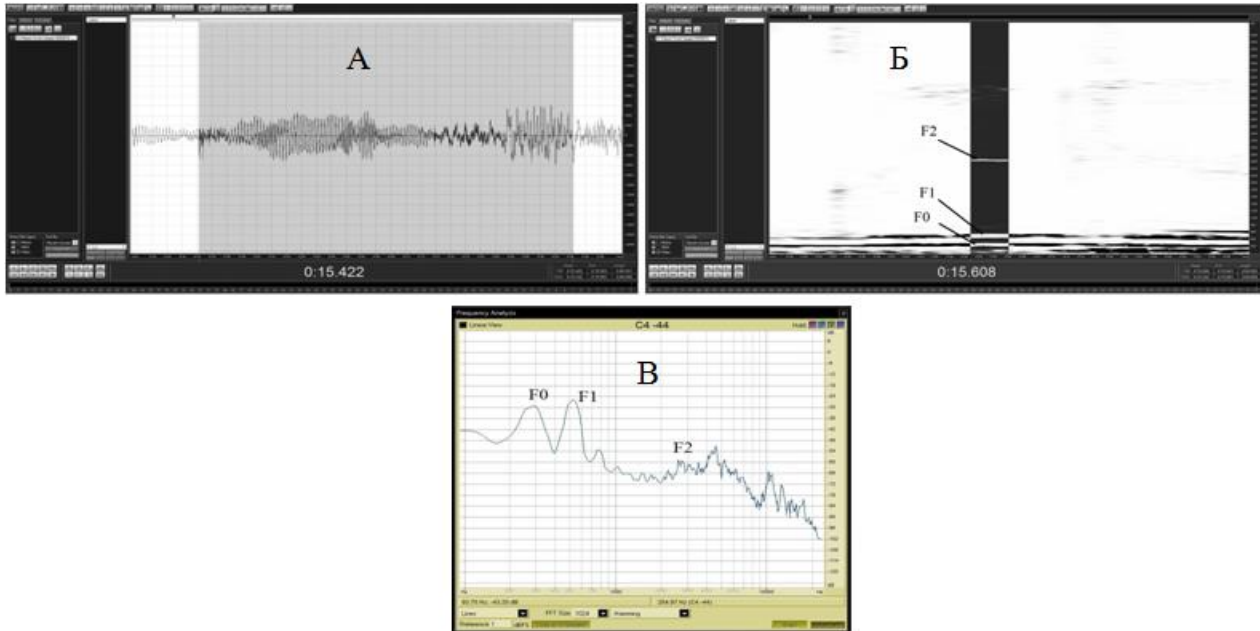
Акустический спектрографический анализ. Инструментальный анализ осуществляли с использованием компьютерных программ «Cool Edit Pro 2.0» (Syntrillium Software Corporation, USA, 2002) и Adobe Audition 1.5 (Adobe System Corporation, USA, 2004). В данных программах осуществляли прослушивание речевого материала и выбор слов, на которые падает фразовое ударение. Для выделенного слова определяли длительность. По аналоговой форме слова выделяли ударный и безударные гласные (первый гласный после ударного, и первый гласный перед ударным, которые в дальнейшем анализировали вместе); стационарные участки гласных, определяли их длительность.

Спектральный анализ осуществляли на основе быстрого преобразования Фурье, данные взвешивали с помощью окна Хемминга при 1024 точках отсчета.

За стационарный участок принимали участок спектрограммы, на котором значения формант претерпевают минимальные изменения, то есть артикуляция практически не изменяется (Бондарко, 1988). Границы стационарного участка определяли в точках изменения частот спектральных составляющих.

Для ударного и безударного гласного на стационарном участке определяли значения частоты основного тона (F_0), значения первой (F_1) и второй (F_2) формант. Первый спектральный максимум принимали за ЧОТ. Спектральный максимум – это наиболее энергетически выраженная область частот, по отношению к окружающим областям, значение частоты спектрального максимума определяли в максимальной точке огибающей спектра при визуальной аппроксимации. За форманты принимали наиболее энергетически выраженные спектральные максимумы или резонансные пики на огибающей спектра сигнала, следующие за первым спектральным максимумом (Деркач и др., 1983) (Рисунок 1). На двухформантной плоскости в координатах двух первых формант (значения F_1 по горизонтальной оси, значения F_2 по

вертикальной оси) строили формантные треугольники с вершинами, соответствующими значениями двух первых формант кардинальных гласных [a], [u], [i] для ударных и безударных гласных.



А – осциллограмма с выделенным словом, по горизонтальной оси – время, мс, по вертикальной оси – условные единицы. Б – динамическая спектрограмма с выделенным стационарным участком ударного гласного [и]. В - представление ударного гласного в координатах: по горизонтальной оси – частота, Гц, по вертикальной оси – интенсивность, дБ.

Рисунок 1. Пример акустического спектрографического анализа (слово «крики», девочка 14 лет).

Считали значения площади по формуле (Vorperian, Kent, 2007), модифицированной для русского языка (Ляксо, Григорьев, 2013).

$$\text{Площадь} = 0,5 * \{ (F2[i] * F1[a] + F2[a] * F1[u] + F2[u] * F1[i]) - (F1[i] * F2[a] + F1[a] * F2[u] + F1[u] * F2[i]) \} \quad (1)$$

где $F1[x]$ и $F2[x]$ - значения первой и второй форманты соответствующих гласных (x).

По значениям первой и второй форманты определяли значения индекса артикуляции гласных (ИАГ, vowel articulation index, VAI) (Roy et al, 2009).

$$\text{VAI} = (F1[a] + F2[i]) / (F1[i] + F1[u] + F2[a] + F2[u]) \quad (2)$$

Интенсивность формант E_n нормировали по отношению к интенсивности ЧОТ (E_0), E_n/E_0 .

Перцептивное исследование. Для перцептивного анализа созданы 42 тестовые последовательности, по 21 последовательности, содержащей речь мальчиков и речь девочек. Каждая тестовая последовательность состояла из 30 слов, каждое слово повторялось по три раза, интервалы между предъявлениями разных слов составляли 15 секунд, между повторениями – 5 секунд. Предъявление тестовых последовательностей осуществляли в свободном поле.

В исследовании приняли участие 543 аудитора (188 мужчин и 355 женщин) в возрасте $19,3 \pm 1,2$ лет. Аудиторам для заполнения были предложены анкеты, в которых напротив номера каждого слова было необходимо побуквенно записать его значение. Аудиторы не имели ранее диагностированных нарушений слуха. У части ($n=35$) аудиторов дополнительно производили измерение порогов слуха и проверку фонематического слуха, что позволило исключить наличие поражения слуховой системы (Бобошко и др., 2010). В речевом диапазоне все аудиторы имели пороги слышимости в пределах нормы (0-20 дБ) по данным тональной аудиометрии; нарушений фонемного восприятия не выявлено.

Обработка анкет включала в себя определение верно распознанных слов. Истинное значение слова определял экспериментатор на основании контекста при прослушивании фразы ребенка, в случае необходимости – при просмотре видео материала диалогического взаимодействия экспериментатора с ребенком. Полностью распознанными считались слова, лексическое значение которые распознали более чем 75% аудиторов.

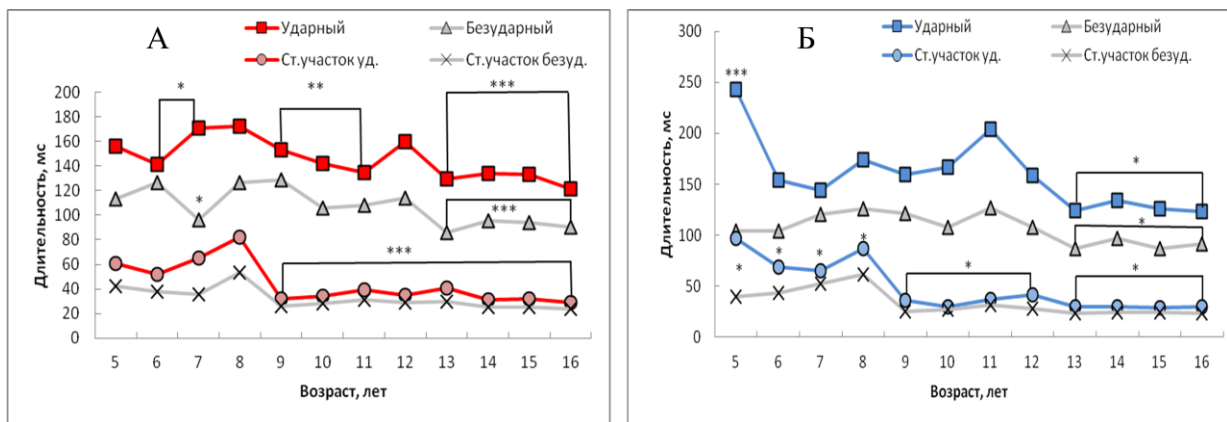
Фонетическое описание слов осуществлено в системе САМПА для русского языка и международного фонетического алфавита (МФА).

Статистическая обработка данных. Статистическую обработку данных осуществляли в статистическом пакете «Statistica 10.0» с использованием непараметрических критериев Манна-Уитни, Краскела-Уоллиса, ранговой корреляции Спирмена (при уровне значимости $p < 0,05$), регрессионного, множественного регрессионного и дискриминантного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Значения длительность гласных из слов детей 5-16 лет. В проведенном исследовании показано нелинейное изменение временных характеристик гласных. Значения длительности ударных гласных в словах девочек составляют в 5 лет 156 мс (медианные значения), значительно повышаются к 7 годам (171 мс) ($p < 0,05$; критерий Манна-Уитни), понижаются в возрасте 9-11 лет (153 мс в 9 лет и 134,5 мс в 11 лет) ($p < 0,01$; критерий Краскелла-Уоллиса) и стабилизируются в возрасте 13-16 лет (129,5 мс в 13 лет и 121 мс в 16 лет) ($p < 0,001$) (Рисунок 2А). Значения длительности ударных гласных из слов мальчиков в 5 лет составляют 243 мс, и снижаются к возрасту 13 лет (124 мс) ($p < 0,05$) (Рисунок 2Б).

Значения длительности безударных гласных из слов девочек в 5 лет – 113 мс, снижаются к возрасту 13-16 лет (от 86 мс в 13 лет до 90 мс в 16 лет) ($p < 0,05$). Значения длительности безударных гласных из слов мальчиков составляют в 5 лет 104 мс и снижаются к 13 годам (87 мс) ($p < 0,05$).



А – данные для девочек, Б – данные для мальчиков. Линия с квадратным маркером – длительность ударных гласных, линия с треугольным маркером – длительность безударных гласных, линия с круглым маркером – длительность стационарных участков ударных гласных, линия с X-маркером – длительность стационарных участков безударных гласных. * - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$, критерий Краскелла - Уоллиса. По горизонтальной оси – возраст, лет; по вертикальной оси – длительность, мс.

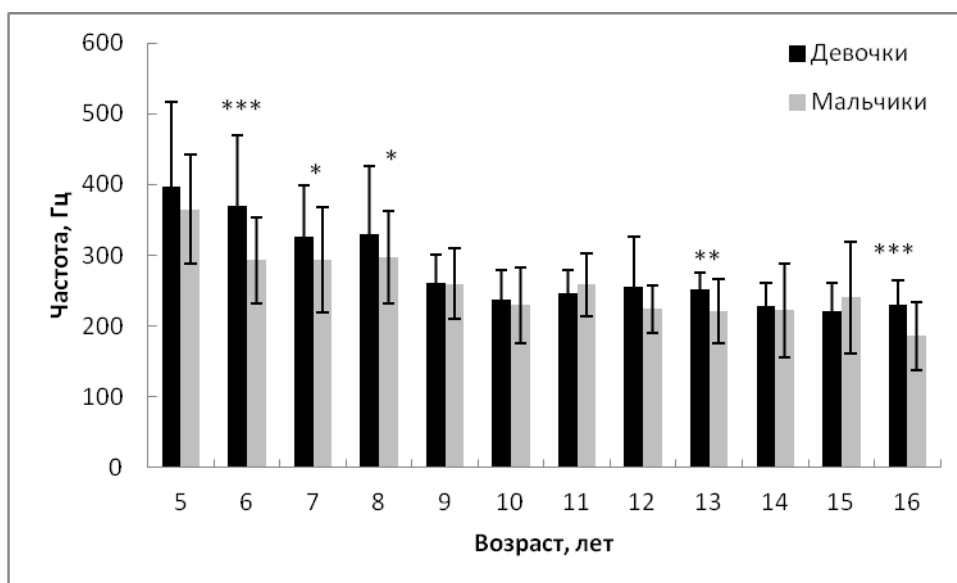
Рисунок 2. Значения длительности ударных и безударных гласных из слов девочек и мальчиков 5-16 лет.

Полученные данные о стабилизации значений длительности ударных и безударных гласных к возрасту детей 13 лет могут свидетельствовать об

окончании формирования речевого дыхания к этому возрасту. Согласно литературным данным, речевое дыхание детей в 7 лет отличается от речевого дыхания, присущего взрослым (Noit et al., 1990). К возрасту 10 лет эти отличия практически исчезают, однако формирование некоторых показателей речевого дыхания (дыхательный объем легких, уровень звукового давления) продолжается в подростковом возрасте (Noit et al., 1990). Указывают, что показатели речевого дыхания зависят от возраста информанта, но не его пола (Boliek et al., 2009).

Значения частоты основного тона. Значения ЧОТ из слов девочек максимальны в возрасте 5-8 лет (от 398 ± 119 Гц в 5 лет до 329 ± 96 Гц в 8 лет), затем значимо ($p < 0,05$; критерий Краскела - Уоллиса) снижаются и остаются стабильными в возрасте 9-13 лет (261 ± 39 Гц в 9 лет, 252 ± 24 Гц в 13 лет); снижаются ($p < 0,01$) к возрасту 14-16 лет (227 ± 33 Гц в 14 лет, 230 ± 35 Гц в 16 лет). Значения ЧОТ ударных гласных из слов мальчиков в 5 лет (365 ± 78 Гц) максимальны ($p < 0,001$) по сравнению с другими анализируемыми возрастами; затем снижаются и остаются стабильно высокими в возрасте 6-8 лет (292 ± 61 Гц в 6 лет, 296 ± 66 Гц в 8 лет) ($p < 0,05$). В возрасте мальчиков 9-11 лет наблюдается сначала понижение (229 ± 53 Гц в 10 лет), а затем повышение значений ЧОТ (259 ± 44 Гц в 11 лет) ($p < 0,05$). К 12-летнему возрасту мальчиков значения ЧОТ снижаются, достигая минимальных значений - в 16 лет (224 ± 34 Гц в 12 лет, 186 ± 48 Гц в 16 лет) ($p < 0,05$).

При сравнении значений ЧОТ ударных гласных из слов мальчиков и девочек установлено, что значения ЧОТ ударных гласных из слов девочек значимо выше соответствующих значений из слов мальчиков в возрасте 6 лет ($p < 0,001$; критерий Манна-Уитни), 7-8 лет ($p < 0,05$), 13 лет ($p < 0,01$) и 16 лет ($p < 0,001$) (Рисунок 3).



Черные столбцы – данные для девочек, серые столбцы – данные для мальчиков, * - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$ - критерий Манна-Уитни. По горизонтальной оси – возраст, лет; по вертикальной оси – значения ЧОТ, Гц.

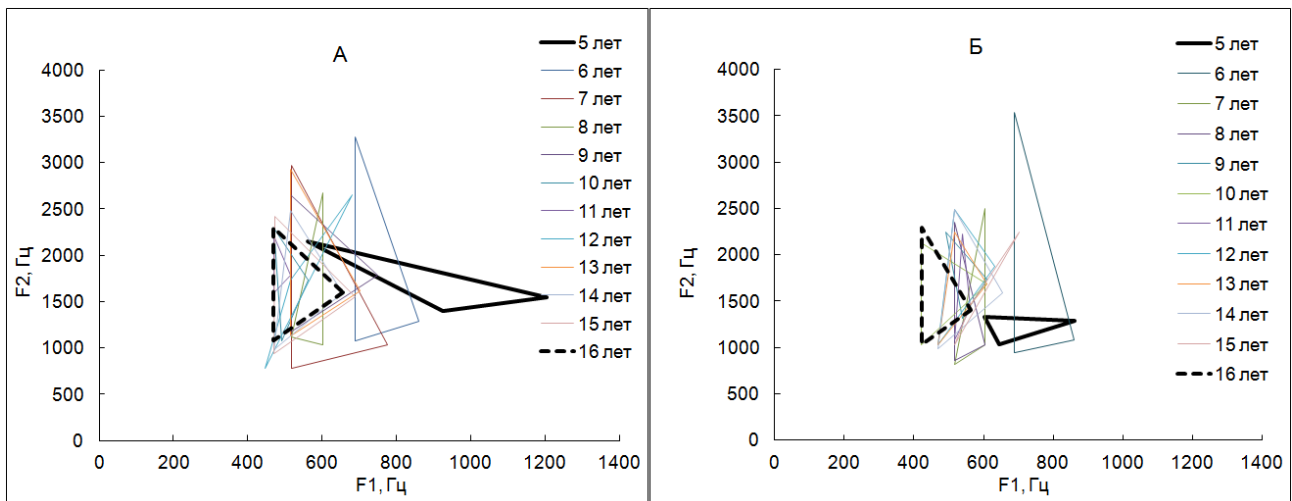
Рисунок 3. Значения ЧОТ ударных гласных из слов детей 5-16 лет.

Согласно полученным в работе данным значения частоты основного тона статистически связаны с полом и возрастом говорящего, что подтверждается результатами исследований, проведенных на материале других языков (Lee, Iverson, 2008; Lee et al., 1999). Однако сведения о возрастных отличиях в значениях ЧОТ противоречивы, что может быть обусловлена ситуациями записи речевого материала – повторяемая речь, спонтанная эмоциональная речь, или, как в проведенном исследовании, ответные реплики детей в диалогах. Таким образом, полученные в работе данные о снижении значений частоты основного тона с возрастом ребенка отражают общие закономерности становления голоса (Hacki, Heitmuller, 1999; Fitch, Giedd, 1999; Hollien et al., 1994; Perry et al., 2001; Markova et al., 2016).

Динамика формантных характеристик ударных гласных. Значения первой форманты ударного гласного [a] из слов девочек максимальны в 5 лет – 1205 Гц (медианные значения) ($p < 0,05$; критерий Краскела-Уоллиса), снижаются до 12 лет ($p < 0,05$) – 516 Гц. В словах мальчиков значения первой форманты ударного гласного [a] максимальны в 5 лет ($p < 0,05$) – 861 Гц, снижаются и стабильны в возрасте 6-13 лет ($p < 0,05$) (689 Гц в 6 лет и 609 Гц в

13 лет), минимальны и стабильны в 14-16 лет ($p < 0,05$) (516 Гц в 14 лет и 563 Гц в 16 лет); ударного гласного [y] максимальны в 5 лет ($p < 0,05$) - 646 Гц и понижаются к 16 годам ($p < 0,01$) – 422 Гц; ударного гласного [и] - в 5 лет составляют 603 Гц и снижаются в 16 лет – 422 Гц ($p < 0,05$). Остальные значения формантных частот ударных гласных [а], [у], [и] из слов мальчиков и девочек подвержены нелинейным изменениям.

Изменение положения формантных треугольников с вершинами, соответствующими значениям первой и второй форманты ударных гласных [а], [у], [и] на двухформантной плоскости, с возрастом детей заключается в смещении в низкочастотную область по значениям первой форманты. Формантные треугольники ударных гласных из слов девочек не изменяют своего положения на двухформантной плоскости, начиная с 14-летнего возраста девочек. Формантные треугольники ударных гласных из слов мальчиков смещаются в низкочастотную область до возраста 16 лет (Рисунок 4).



А – формантные треугольники из слов девочек, Б – формантные треугольники из слов мальчиков. Черная сплошная линия – данные для детей 5 лет, черная пунктирная линия – данные для детей 16 лет, прочие линии – данные для возрастов 6-15 лет. По горизонтальной оси – значения первой форманты, Гц, по вертикальной оси – значения второй форманты, Гц.

Рисунок 4. Формантные треугольники с вершинами, соответствующими значениям первой и второй форманты гласных [а], [у], [и] ударных гласных из слов детей 5-16 лет.

Значения площадей формантных треугольников ударных гласных из слов девочек и мальчиков характеризуются большой вариативностью и нелинейным изменением: от 14335 усл.ед. в 11 лет до 283284 усл.ед. в 7 лет у девочек; от 10810,5 усл.ед. в 15 лет до 116659 Гц в 6 лет у мальчиков. Значения индекса артикуляции ударных гласных из слов девочек и мальчиков изменяются нелинейно и составляют для девочек 0,75 усл.ед. в 5 лет и 0,82 усл.ед. в 16 лет; из слов мальчиков – 0,61 усл.ед. в 5 лет и 0,87 усл.ед. в 16 лет.

Данные о динамике значений формантных частот ударных гласных и о параметрах, отражающих четкость артикуляции на материале русского языка для детей 5-16 лет получены впервые. Полученные данные об улучшении четкости артикуляции можно объяснить сведениями об усилении асимметрии области Брока с возрастом ребенка, достигающей максимума к 5 летнему возрасту в 45 поле, в 44 поле - в 11 лет (Amunts et al., 2003) и формированием тонкого моторного контроля над артикуляционными движениями (Schmithorst et al., 2002; Ashtari et al., 2007). В работе не выявлено четкой связи между наступлением периода полового созревания и изменениями формантных характеристик гласных, что подтверждается данными об отсутствии зависимости между уровнем тестостерона и снижением формантных частот (Puts et al., 2012; Kumar et al., 2016).

Результаты перцептивного анализа. По данным перцептивного анализа установлено, что аудиторы верно распознают лексическое значение 50% слов детей 5 лет; 55% слов детей 6 лет; 48% слов детей 7 лет; 79% слов детей 8 лет; 57% слов детей 9 лет; 56% слов детей 10 лет; 47% слов детей 11 лет; 51% слов детей 12 лет; 63% слов детей 13 лет; 53% слов детей 14 лет; 61% слов детей 15 лет; 55% слов детей 16 лет.

Значимых различий в распознавании между аудиторами разного пола выявлено не было; значимых различий не было обнаружено между аудиторами, имеющими бытовой опыт и не имеющими опыта общения с детьми.

Лучше всего аудиторы распознали лексическое значение слов, вырезанных из речи девочек и мальчиков 8-летнего возраста. Этот возраст

характеризуется созреванием коры больших полушарий и регуляторных структур мозга, что определяет прогрессивные изменения произвольной регуляции и организации деятельности (Безруких и др., 2009, Мачинская и др., 2016). Для всех возрастов, кроме 8 лет, слова, вырезанные из фраз девочек, распознаются лучше, чем слова, вырезанные из фраз мальчиков.

Лексическое значение слов из речи девочек аудиторы хуже всего распознали для возраста 7 лет (48%). Для всех остальных возрастов девочек, аудиторы с вероятностью 0,75 и выше распознают более 50% слов. Лексическое значение слов из речи мальчиков аудиторы хуже всего распознали для возраста 14 лет (38%).

На основании данных мультирегрессионного анализа выявлена связь между вероятностью распознавания лексического значения слов аудиторами $F(11,601)=8,901$; $p<0,000$; $R^2=0,140$ и полом ребенка ($Beta=0,136$; $p=0,001$), длительностью стационарного участка ударного гласного ($Beta=-0,133$; $p=0,014$), значениями E0 ударных гласных ($Beta=0,243$; $p=0,000$).

По данным дискриминантного анализа вероятность распознавания связана $F(11,601)=8,901$; $p<0,000$ с полом ребенка (Wilks'Lambda 0,876; $p=0,001$), длительностью стационарного участка ударных гласных (Wilks'Lambda 0,868; $p=0,014$), и значениями E0 (Wilks'Lambda 0,889; $p=0,000$).

Влияние физиологических показателей на акустические параметры гласных. Выявлены зависимости между полом, возрастом, ростом и весом детей и акустическими характеристиками их гласных.

По данным дискриминантного анализа пол детей связан $F(6,1797)=5,155$; $p<0,0000$ со значениями ЧОТ ударных гласных (Wilks'Lambda 0,965; $p=0,0000$), значениями E0 ударных гласных (Wilks'Lambda 0,947; $p=0,006$), значениями E1/E0 ударных гласных (Wilks'Lambda 0,952; $p<0,0000$) и значениями E2/E0 ударных гласных (Wilks'Lambda 0,949; $p<0,0003$).

На основании данных регрессионного анализа установлено, что возраст девочек связан:

с длительностью ударных гласных $F(1,798)=83,608$; $p<0,000$ ($Beta=-0,308$; $R^2=0,095$); с длительностью стационарных участков ударных гласных $F(1,798)=315,61$; $p<0,000$ ($Beta=-0,532$; $R^2=0,283$); с значениями ЧОТ ударных гласных $(1,892)=458,99$; $p<0,000$ ($Beta=-0,583$; $R^2=0,34$).

На основании мультирегрессионного анализа установлена связь между ростом девочек ($F(4,550)=15,731$; $p<0,000$; $R^2=0,32$) и длительностью ударных гласных в словах ($Beta=-0,204$; $p<0,0001$); ЧОТ ударных гласных ($Beta=-0,265$; $p<0,000$).

Вес девочек связан $F(4,550)=8,6320$; $p<0,00000$; $R^2=0,103$ с длительностью ударных гласных ($Beta=-0,21$; $p<0,0001$), с значениями ЧОТ ударных гласных ($Beta=-0,172$; $p<0,0001$); и значениями первой форманты ударных гласных - $F(6,548)=1,6008$; $p<0,0144$, $R^2=0,17$ ($Beta=-0,096$; $p=0,034$).

На основании данных регрессионного анализа возраст мальчиков связан $F(1,760)=119,26$; $p<0,000$ с длительностью ударных гласных ($Beta=-0,368$; $R^2=0,136$); с длительностью стационарных участков ударных гласных $F(1,760)=435,45$; $p<0,000$ ($Beta=-0,604$; $R^2=0,364$); с значениями ЧОТ ударных гласных $F(1,808)=174,49$; $p<0,000$ ($Beta=-0,421$; $R^2=0,178$).

На основании мультирегрессионного анализа, рост мальчиков связан $F(4,624)=15,833$; $p<0,000$; $R^2=0,09$ с длительностью ударных гласных ($Beta=-0,212$; $p<0,0001$) и значениями ЧОТ ударных гласных ($Beta=-0,122$; $p=0,0015$); $F(6,622)=7,3448$; $p<,00000$; $R^2=0,067$ с значениями F1 ударных гласных ($Beta=-0,099$; $p=0,046$) и E1/E0 ($Beta=-0,232$; $p<0,0000$).

Вес мальчиков связан $F(4,624)=8,8374$; $p<0,00000$; $R^2=0,054$ с длительностью ударных гласных слов ($Beta=-0,217$; $p<0,0000$) и значениями ЧОТ ($Beta=-0,094$; $p=0,017$); значениями F1 - $F(6,622)=6,8818$; $p<0,00000$; $R^2=0,062$ с ($Beta=-0,099$; $p=0,047$), E1/E0 ($Beta=-0,195$; $p=0,0004$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования впервые на материале русского языка прослежена динамика длительности и спектральных характеристик ударных и безударных гласных нормативно развивающихся мальчиков и девочек в возрасте 5-16 лет. Показано значимое снижение значений ЧОТ с возрастом ребенка и выявлена связь между полом ребенка и значениями частоты основного тона. Установлено, что значения длительности ударных и безударных гласных значительно снижаются к возрасту 13 лет у детей обоих полов.

Эти данные отражают общие закономерности становления голоса в онтогенезе и вносят уточнение для детей, живущих в русскоязычной среде.

Впервые на материале русского языка получены оригинальные данные о четкости артикуляции гласных в словах детей 5-16 лет на основании значений площадей формантных треугольников гласных и индекса артикуляции. Получены данные о нелинейной динамике изменения площадей формантных треугольников и индекса артикуляции гласных в словах детей.

Установлена возможность распознавания взрослыми лексического значения слов детей вне контекста фразы. Выявлена связь акустических характеристик слов детей с антропометрическими показателями детей – весом и ростом. Показано, что пол ребенка (мальчики – девочки) влияет преимущественно на значения высоты голоса, возраст – 5-16 лет – на процессы артикуляции.

Таким образом, на материале русского языка подтверждено и расширено представление об общих закономерностях становления голоса и получены оригинальные данные об артикуляционных характеристиках русскоязычных детей в возрастном диапазоне 5-16 лет.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что изменения значений длительности ударных и безударных гласных в словах девочек и мальчиков носят нелинейный характер, и значимо снижаются к 13 летнему возрасту детей. Установлено, что значения частоты основного тона ударных гласных в словах девочек значимо выше соответствующих значений из слов мальчиков в возрасте 6-8 лет, 13 лет и 16 лет. Значения частоты основного тона значимо снижаются у девочек к 14 годам, у мальчиков к 16 годам.
2. Показано нелинейное изменение значений двух первых формант ударных гласных в словах детей 5-16 лет, при значимом снижении значений первой форманты ударного гласного [y] из слов девочек к 12 годам; из слов мальчиков - ударного гласного [a] к 14 годам, ударных гласных [y], [и] – к 16 годам. Значения индекса артикуляции и площадей формантных треугольников гласных характеризуются большой вариативностью и нелинейным изменением в возрасте детей 5-16 лет.
3. Выявлено, что вероятность распознавания взрослыми лексического значения слов детей выше для слов девочек. Вероятность распознавания лексического значения слов детей связана с акустическими характеристиками ударных гласных - длительностью и значениями интенсивности частоты основного тона. Возраст детей значимо не влияет на вероятность распознавания значения их слов за исключением большей вероятности распознавания слов 8 летних детей и наименьшей – слов мальчиков 14 лет.
4. Рост девочек влияет на значения частоты основного тона и длительность ударных гласных в словах, вес влияет на значения первой форманты, длительность и значения частоты основного тона ударных гласных. Вес и рост мальчиков влияет на длительность ударных гласных, значения частоты основного тона, первой форманты и ее интенсивности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ.

1. **Григорьев А.С.**, Ляксо Е.Е. Особенности восприятия взрослыми слов детей 5-7 летнего возраста, исключенных из контекста фразы // Вестник СПбГУ, Серия 3. Биология. - 2012. - С. 79-90.
2. Ляксо Е.Е., Фролова О.В., Смирнов А.Г., Куражова А.В., Гайкова Ю.С., Бедная Е.Д., **Григорьев А.С.** Уровень речевого развития детей на этапе формирования навыка чтения // Психологический журнал. – 2012. – Т. 33. №1. – С. 73-87.
3. Ляксо Е.Е., **Григорьев А.С.** Динамика длительности и частотных характеристик гласных на протяжении первых семи лет жизни детей // Российский Физиологический журнал им. И.М.Сеченова. – 2013. – № 9. – С. 1097-1110.
4. Lyakso E.E., **Grigor'ev A.S.** Dynamics of the Duration and Frequency Characteristics of Vowels during the First Seven Years of Life in Children // Neuroscience and Behavioral Physiology. – 2015. - V. 45. - I. 5. – P.558-567 (Переводная версия статьи № 3).
5. **Григорьев А.С.**, Ляксо Е.Е. Слуховое восприятие слов детей 5-8 лет // Сенсорные системы. – 2014. – № 3. – С. 28-35.
6. Ляксо Е.Е., Фролова О.В., **Григорьев А.С.**, Соколова В.Д., Яроцкая К.А. Распознавание взрослыми эмоционального состояния типично развивающихся детей и детей с расстройствами аутистического спектра. // Российский Физиологический журнал им. И.М.Сеченова. – 2016. – Т.102. – № 6. – С.729-741.
7. E. E. Lyakso, O. V. Frolova, **A. S. Grigor'ev**, V. D. Sokolova, and K. A. Yarotskaya. Recognition by Adults of Emotional State in Typically Developing Children and Children with Autism Spectrum Disorders // Neuroscience and Behavioral Physiology. – 2017. – V. 47. – No. 9. – P. 1051-1059 (Переводная версия статьи № 6).

8. **Григорьев А. С.**, Ляксо Е. Е. Акустические характеристики гласных из слов детей 14-16 лет // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. - 2017. - № 5. – С. 1750202-1 – 1750202-4.
9. H.Kaya, A. A.Salah, A. Karpov, O. Frolova, **A. Grigorev**, E. Lyakso. Emotion, age, and gender classification in children's speech by humans and machines // Computer Speech & Language. – 2017. – V. 46. – P. 268-283.
10. Lyakso E., Bednaya E., **Grigorev A.** Auditory and Spectrographic Analysis of the Words of 2-8 Years-Old Russian Children / M. Zelezn'y et al. (Eds.): Lecture Notes in Computer Science Avicenum. - New York : Springer Verlag. - 2013. - P. 54–61.
11. Elena E. Lyakso, Olga V. Frolova, **Aleksey S. Grigorev.** Infant Vocalizations at the First Year of Life Predict Speech Development at 2 - 7 Years: Longitudinal Study // Child Psychology. - 2014. - V.5. - No.12. – P. 1433-1445.
12. Lyakso E., Frolova O., **Grigorev A.** A Comparison of Acoustic Features of Speech of Typically Developing Children and Children with Autism Spectrum Disorders // Lecture Notes in Computer Science. - Chapter - Speech and Computer. – 2016. – V. 9811. – P. 43-50.
13. Lyakso E., Frolova O., **Grigorev A.** Perception and Acoustic Features of Speech of Children with Autism Spectrum Disorders // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – LNAI 10458. – P. 602-612.
14. **Григорьев А.С.**, Ляксо Е.Е. Слуховое восприятие слов детей 5-8 лет // Тезисы сообщений VI Всероссийской конференции-школы по «Физиологии слуха и речи», посвященной памяти чл.-корр. АН СССР Г.В. Гершуни, СПб, 26-28 ноября. – 2013. – С. 39-40.
15. **Григорьев А.С.**, Ляксо Е.Е. Использование корпуса детской речи для изучения становления речевой функции // Сборник научных трудов участников международной научной конференции молодых ученых «Психология XXI века: системный подход и междисциплинарные исследования». – 2017. – Т.2. – С. 73-77.