

4. *Homans J.* Apollo's Angels: a History of Ballet. New York: Random House Trade Paperbacks, 2010. 643 p.
5. *Lopuhov F.* Puti baletmejstera. Berlin: Petropolis, 1925. 178 s.
6. *Lopuhov F.* V glub' horeografii. M.: Folium, 2003. 190 s.
7. *Kunzmann V.* Jean-Fery Rebel (1666-1747) and his instrumental music. Columbia Univ., ProQuest Diss Publishing, 1993. 534 p.
8. *Cessac C.* Les éléments (1737-1738) de Jean-Fery Rebel: spécifité et nouveauté d'une symphonie de dance (these). Paris: Universit. of Paris IV, 1990. 38 p.
9. *Cessac C.* Jean-Fery Rebel (1666-1747). Musicien des Éléments. Paris: CNRS Éditions, 2007. 192 p.
10. *Christie W., Agnew P.* Master Class on Julliard Historical Performance, November 8, 2016. Jean-Féry Rebel «Les Caractères de la Dance». URL: <https://youtu.be/JRg6jyERCY0> (data obrashcheniya: 22.02.2018).
11. *Fokin M.* Protiv techeniya. Vospominaniya baletmejstera. L.: Iskusstvo, 1981. 510 s.
12. *Roland-Manuel A.* Maurice Ravel. Paris: Gallimard, 1948. 191 p.
13. *Gerver L.* Muzyka i muzykal'naya mifologiya v tvorchestve russkih poetov (pervye desyatiletiya HKH veka). M.: Indrik, 2001. 248 s.
14. *Slonimskij Yu.* Dlya baleta, o balete // Vospominaniya o B. V. Asaf'eva / sost. A. Kryukov. L.: Muzyka, 1974. 528 s.
15. *Gusev P.* Drug baleta // Vospominaniya o B. V. Asaf'eva / sost. Kryukov A. L.: Muzyka, 1974. 528 s.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Г. А. Безуглая — канд. искусствоведения, доц.; [bezuglaya@inbox.ru](mailto:bezuglaya@inbox.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Galina A. Bezuglaia — Cand. Sci. (Arts); [bezuglaya@inbox.ru](mailto:bezuglaya@inbox.ru)

УДК 782:681.8

## МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ОПЕРНЫХ ТЕАТРОВ

А. И. Кузнецова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Гуманитарный университет профсоюзов, ул. Фучика, 15, Санкт-Петербург, 192238, Россия

В статье представлен обзор исследований, посвященных методам моделирования акустического пространства оперных театров. Рассматриваются основные этапы развития проектирования, дается обзор различных подходов к расчету структуры звуковых полей в помещениях. Основное внимание уделяется современной технологии компьютерного моделирования акустики помещений с описанием особенностей восприятия звука, рассмотрением операций для реализации виртуального звукового образа. Показываются плюсы и минусы новой технологии, область ее применения, приводится пример оперного зала, построенного с использованием современных технологий моделирования акустики помещений.

**Ключевые слова:** акустика, оперные театры, акустическое моделирование, проектирование, компьютерное моделирование, аурализация

## METHODS OF MODELLING ACOUSTIC SPACE FOR OPERA HOUSES

Anna I. Kuznetsova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg University of Humanities and Social Sciences, 15, Fuchika Str., Saint-Petersburg, 192238, Russia Federation

The article presents a review of research dedicated to the methods of modelling acoustic space of opera houses. It concerns the main stages of design development, as well as different approaches for calculating sound fields inside the premises. The main focus of the article is on the state of the art computer modelling technologies, with include describing sound perception features, along with the process of implementing this virtual sound image in real life. The article indicates advantages and disadvantages of modern technologies and their area of application. Finally, it provides an example of opera house built using these technologies for modelling acoustic halls.

**Keywords:** acoustics, opera houses, acoustical modelling, designing, computer modelling, auralization

Выполненный в предыдущей статье<sup>1</sup> анализ эволюционного развития оперных театров показал переход от эмпирического проектирования к созданию театров на современной научной основе. Научный подход к акустическому моделированию зам-

<sup>1</sup> Кузнецова А. И. История изучения акустических пространств оперных театров: материалы VIII Всерос. науч.-практ. конференции, 26 марта 2016 г. СПб: СПбГУП, 2016. С. 74–75

кнутых пространств начал формироваться в конце XIX – начале XX века. Основные этапы развития акустики оперных театров связаны с именами таких известных ученых как: В. Сэбин, С. Эйринг, Л. Беранек, Г. Олсон, Х. Кутруф, М. Шредер, В. Кнудсен, М. Барон, И. Андо, В. Анерт, и др. В XX столетии усовершенствовались методы расчета объективных акустических характеристик и определились многие аспекты их связи с субъективным впечатлением слушателя об акустических качествах пространства. В России значительный вклад в решение проблем акустики театральных залов внесли В. В. Фурдуйев, М. А. Сапожков, А. Н. Качерович, В. С. Маньковский, Л. И. Макриненко, М. Ю. Лане и др. Развитие данного направления научных исследований привело к появлению компьютерных методов моделирования акустического пространства, разработка которых в настоящее время активно продолжается. В центре внимания исследователей сегодня находится проблема совершенствования алгоритмов расчета аурализации моделей помещений [1, с. 475; 2, с. 73].

Для решения вопросов акустики первыми стали использоваться водяные и оптические модели. В 60-е годы XX века появился метод трехмерного масштабного физического моделирования. Метод заключался в том, что создавалась модель зала уменьшенного размера с необходимыми архитектурными элементами внутри и звукопоглощающими материалами на поверхности (рис. 1).

На таких моделях производились предварительные измерения времени реверберации, структуры отражений, подбирались оптимальное расположение архитектурных деталей и звукопоглощающих материалов. Недостатками уменьшенных моделей являются чрезвычайно трудоемкий процесс их изготовления и недостаточно точные измерения. К тому же, анализ процессов в высокочастотной области трудно сделать тождественным процессу реверберации в полном частотном диапазоне [3, с. 58].

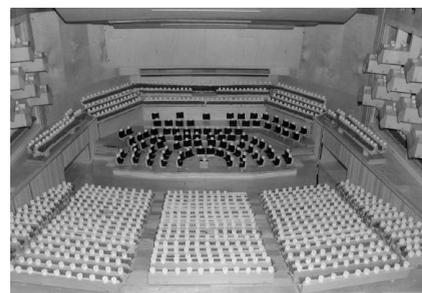


Рис. 1. Уменьшенная модель помещения для акустических исследований масштаба 1:20 (вид изнутри)

В 1980-е годы оценку акустического качества проектируемого помещения проводили посредством комбинирования масштабного и электроакустического моделирования. В модели помещения, выполненной в масштабе 1:20, проводились импульсные измерения, по итогам которых в различных точках модели определялись следующие параметры: уровни, запаздывание, спектральный состав и направление прихода наиболее интенсивных отражений, а также время реверберации помещения. Затем для каждой точки импульсных измерений формировалась звуковая картина, соответствующая значениям указанных параметров. Эта картина предъявлялась слушателям для оценки [3, с. 61]. Несмотря на то, что в настоящее время активно развиваются техники компьютерного моделирования, метод трехмерного масштабного моделирования применяется до сих пор.

Расчет структуры звуковых полей в помещениях (с помощью компьютерных программ — CATT, ODEON, EASE и др.) проводятся с учетом трех разных подходов, связанных со статистической, геометрической и волновой теориями [1, с. 475].

**Статистический метод анализа** применяется в диффузном звуковом поле, когда энергия отраженных волн превышает энергию прямых звуковых волн. Его используют только в ограниченной области частот и для определенных зон в помещении. Статистический метод, например, нельзя применять для анализа звукового поля вблизи сцены или вблизи сильно заглушенных поверхностей.

С помощью статистической теории могут быть определены следующие основные параметры звукового поля в помещении: среднее время ( $\tau$ ) и средняя длина свободного пробега звуковой волны ( $l_{cp}$ ); средний коэффициент поглощения ( $\alpha_{cp}$ ); время реверберации ( $T$ ).

Для качества звучания музыки и речи в помещениях огромное значение имеют ранние отражения, которые формируют у слушателя ощущение пространства зала, интимности и др. Однако в этот период времени (порядка 80 мс в зависимости от размера зала) звуковое поле еще нельзя считать равномерным, и методы статистической теории здесь неприменимы. В этом случае применяются методы геометрической теории, а именно: метод мнимых источников, Ray-tracing, Beam-tracing и др. [4, с. 326].

**Геометрическая теория** базируется на аналогии законов геометрической оптики законам распространения звуковых волн. Для зеркальных (отражающих) поверхностей угол падения равен углу отражения; падающий и отраженные лучи лежат в одной плоскости; время прихода луча определяется пройденным расстоянием и скоростью распространения звука [1, с. 483]. Следовательно, распространение звуковых лучей в замкнутом пространстве можно представить графически и получить информацию о начальном участке формирования звукового поля в помещении. Общий характер этого поля определяется путем построения эскизов отраженных лучей для различных точек помещения (лучевой метод). Характер отражений зависит от формы отражающей поверхности: рассеивание звука происходит на выпуклых поверхностях, фокусирование — на вогнутых поверхностях. От плоских поверхностей отражения могут рассматриваться как, если бы они исходили от мнимого источника, являющегося зеркальным отражением реального источника. Поэтому для анализа звукового поля иногда используется алгоритм расчета звукового поля путем построения множественных мнимых источников. С помощью метода мнимых источников можно определять траектории движения лучей от источника до приемника звукового давления; можно прогнозировать углы отражения звуковых лучей.

Интенсивность отражений зависит от характера и вида распределения звукопоглощающего материала на стенах помещения. Пример построения эскизов отраженных лучей для оперного зала показан на рис. 2 [1, с. 484]. Используя метод мнимых источников, можно оценить роль отдельных участков помещения в формировании звукового поля в плоскости размещения слушателей, построить распределение площадок первых, вторых и т.д. отражений.

Благодаря методам геометрической теории было выявлено, что для помещения прямоугольной формы с источником звука, расположенным около одной из стен на определенной высоте, площадки первых отражений будут располагаться на потолке и боковых стенах. Размеры площадок первых отражений будут тем

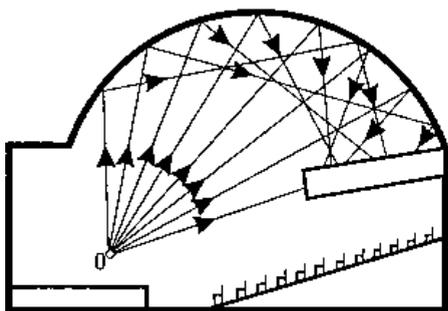


Рис. 2. Эскиз отраженных лучей для оперного зала

больше, чем дальше от них будет расположен источник звука. Попадая на потолок, звуковой сигнал, как правило, приходит на плоскость слушательских мест в начальном интервале реверберационного процесса. На боковых стенках помещения площадки первых отражений обычно находятся ниже высоты расположения источника звука. На полу и на задней стене также есть площадки первых отражений, но они значительно меньше по площади и практически не влияют на структуру. Из этого следует,

что существенный вклад в структуру первых отражений вносят форма и степень заглушения потолка и нижней части боковых стен.

Временной участок, где отчетливо определяются ранние отражения, составляет от 60–80 мс до 200 мс в зависимости от размеров зала (с увеличением размеров зала этот временной отрезок увеличивается). Структура ранних отражений зависит от объема, формы помещения, а также от наличия и распределения звукопоглощающего материала в нем.

Методы геометрической акустики широко используются в настоящее время при расчете звуковых полей в помещениях, однако область применения лежит в основном в высокочастотном диапазоне. Этот метод моделирования используется в современных компьютерных программах для расчета структуры звукового поля в помещении (например, CATT, Odeon, EASE и др.) [1, с. 483].

**Волновая теория** рассматривает помещение как резонатор. Так как воздушный объем зала имеет определенную массу и упругость, то можно вычислить собственные частоты и собственные формы колебаний зала.

Плотность спектра собственных частот помещения является важнейшей характеристикой его акустических свойств. Так как при возбуждении воздушного объема в помещении на его собственных частотах происходит усиление соответствующих частот, в спектре источника звука за счет резонансов и соответственно искажается тембр — появляется «окрашивание» звука.

Плотность спектра резонансов помещения возрастает с увеличением объема помещения и с увеличением частоты. Наиболее опасной является низкочастотная область, где плотность спектра менее однородна и помещение вносит больший вклад в изменение тембра источника звука. Но для больших помещений эта часть дискретного спектра располагается в области частот 18–60 Гц, т.е. ниже обычного диапазона музыкальных инструментов и голоса. Объем залов оперных театров обычно находится в пределах от 9000 м<sup>3</sup> (Оперный театр в Одессе) до 24724 м<sup>3</sup> (Метрополитен-Опера, Нью-Йорк) [5, с. 501], следовательно, возможные тембральные искажения в них сведены к минимуму. Для малых помещений область дискретного спектра попадает в музыкальный и речевой диапазон и приводит к значительному окрашиванию звука.

На основе волновой теории производится расчет структуры звукового поля помещения, после чего методами компьютерного моделирования производится

оптимизация формы помещения, размещение в нем различных отражающих поверхностей и звукопоглощающих материалов. Волновая теория является наиболее точным, но и наиболее трудоемким методом расчета структуры звуковых полей в помещениях.

Все три теории расчета звукового поля в замкнутом пространстве нашли применение в современных компьютерных комплексах (EASE, Odeon, CATT и др.), способных рассчитать структуру звукового поля в помещении, представить эскизы распространения звуковых лучей в заданных точках пространства, построить структуру реверберационного процесса, рассчитать импульсную характеристику, собственные частоты и собственные формы колебаний помещения.

Объективные параметры, полученные с помощью волновой, статистической или геометрической теорий, позволяют достаточно полно описать структуру звукового поля и процессы реверберации в оперных залах, выступая в качестве научной основы их проектирования и оценки.

**Аурализация** — принципиально новый этап в создании техники компьютерного моделирования акустики помещений. М. Клейнер (Mendel Kleiner) в 1989 г. на конгрессе AES дал следующее определение: «Аурализация — это процесс превращения звукового поля источника в пространстве в “слышимый звук” путем физического или математического моделирования с целью создания бинаурального слухового ощущения на заданной позиции моделируемого пространства» [6, р. 316]. Фирма Одеон (Odeon) предложила иное определение аурализации: «Аурализация есть искусство создания цифровых моделей бинауральных записей в несуществующих помещениях» [7, с. 48].

Как сделать, чтобы музыкальный сигнал после его компьютерной обработки слушатель воспринимал так же, как если бы он слушал музыку в реальном оперном театре, находясь при этом в любом другом помещении? Проблема аурализации связана с задачей «обмануть» мозг, чтобы сформировать у слушателя субъективное ощущение виртуального трехмерного звукового пространства.

Слуховая система человека воспринимает лишь два физических параметра сигнала: интенсивность (т.е. энергию или звуковое давление), и длительность — начало и конец сигнала, его повторяемость во времени (периодичность или частоту). Воздействующие на барабанную перепонку изменения величины звукового давления во времени обуславливают восприятие человеком звука. В звуковых волнах, являющихся сжатием и разрежением плотности воздуха, содержится вся информация, которую мы получаем о звуке. Все остальное, что человек оценивает в звуковом сигнале — громкость, высота, тембр, звуковое пространство, тонкие музыкальные нюансы и пр. — это следствие обработки звука нашим слуховым аппаратом и мозгом.

Восприятие звука в помещении представлено следующими процессами: музыкальный инструмент (голос, оркестр и т.п.) создает определенный акустический сигнал, который представляет собой некую звуковую волну, с определенной зависимостью звукового давления от времени  $p_1(t)$ . Этот сигнал определенным образом изменяется помещением за счет процессов отражения, поглощения, рассеяния, за счет способности звука огибать препятствия и т.д. В результате меняется временная структура, тембр, баланс громкостей, пространственные характеристики. Также

свою обработку звукового сигнала производят голова и ушные раковины. В результате, получив информацию от периферической слуховой системы, мозг определяет свойства и параметры помещения, место расположения источника звука. Все эти параметры создают ощущение трехмерного звукового пространства.

При использовании техники аурализации помещение рассматривают как линейный фильтр, который имеет свои импульсные характеристики  $p_{\text{пом}}^i(t)$ . В каждой  $i$ -точке пространства суммарный сигнал (источника и характеристик помещения) получается как «свертка» этих сигналов. Термином «свертка» называется результат обработки одного сигнала другим, например:

$$p_{\Sigma}^i(t) = p_1 \otimes p_{\text{пом}}^i = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(t) p_{\text{пом}}^i(\tau - t) dt$$

Следовательно, чтобы вызвать у слушателя такие же ощущения как в естественном оперном театре, надо выполнить следующие операции: записать оригинальный звуковой источник, программно изменить его импульсную характеристику так, как это делает заданное помещение, произвести фильтрацию звукового сигнала аналогично процессам, которые происходят в слуховой системе. После этого можно воспроизвести такие сигналы через головные телефоны и получить ощущение нахождения в реальном трехмерном акустическом пространстве (в зале оперного театра) вместе с источником звука (вокалистом, ансамблем, оркестром).

Виртуализация звукового образа происходит в пакетах компьютерных программ (EASE, Odeon и CATT) путем последовательного выполнения следующих операций:

- вносится информация о свойствах источника звука из библиотеки записанных или синтезированных звуков в моно варианте;
- рассчитывается структура звукового поля в заданном помещении и производится расчет импульсной характеристики этого поля в заданных точках расположения левого и правого уха слушателя;
- из заранее составленной библиотеки берутся значения передаточных функций головы, которые соответствуют данному положению источника и слушателя, из чего получают импульсные характеристики (BRIR);
- производится «свертка», т.е. последовательная обработка сигнала источника с импульсными характеристиками помещения и импульсными характеристиками головы.

Полученную информацию в виде стереосигнала подают на головные телефоны, при этом слушатель ощущает, что он находится на определенном месте внутри зала, а звук окружает его со всех сторон. При смене положения слушателя или источника звука производится пересчет передаточных функций.

Компьютерное моделирование акустики помещений методом аурализации в настоящее время стремительно развивается. Создаются программы, учитывающие движения головы (система BRS), в которых при поворотах или подъеме го-

ловы происходит пересчет соответствующих параметров звукового поля, что дает возможность услышать в головных телефонах, как происходит перемещение источника звука в пространстве. Для выполнения этой функции необходимо постоянное отслеживание движения головы и пересчет соответствующих бинауральных импульсных характеристик. Отслеживание происходит при помощи различных систем обратной связи — от простейших инфракрасных датчиков, расположенных на стереотелефонах, до сложных и дорогостоящих систем обратного контроля.

Для получения трехмерного звукового пространства при прослушивании через акустические системы необходимо решить проблему наложения реверберационного поля вторичного помещения. В рассматриваемом случае оно выступает в роли негативного фактора, так как вся необходимая информация о помещении уже закодирована в сигнале. Следующим фактором является возникновение перекрестных связей: сигналы от правого канала попадают не только на правое ухо, но и на левое, тем самым разрушая звуковой образ. Такие же проблемы приходится решать и в технике бинауральной стереофонии, которая в настоящее время активно развивается. В ходе исследований были разработаны различные методы проектирования бифонических процессоров. Благодаря этим методам реализуется подавление перекрестных связей в ревербирующих помещениях. Также были спроектированы адаптивные процессоры, которые могут подавлять отражения во вторичном помещении. Нерешенной проблемой остается расширение зоны прослушивания. На сегодняшний момент удается получить пространственный эффект только для ограниченной позиции слушателей. Решение этой проблемы позволит обеспечить возможность прослушивания бинауральных сигналов через акустические системы. При этом достаточно будет двух акустических систем на левый и правый канал для воссоздания трехмерного пространственного звукового образа.

Область применения технологии компьютерного моделирования пространственных звуковых полей не ограничивается моделированием акустического пространства. Аурализацию можно применять в технике звукозаписи, в модернизации систем пространственной звукопередачи, в разработке пространственных эффектов; в системах мультимедиа для создания аудио-, видео-, виртуальных пространств; для тренировки слепых в распознавании и локализации источников звука; в проведении научных экспериментов (в частности, в психоакустике); в системах обнаружения и распознавания различных источников сигнала в пространстве (в авиации и др.).

Применительно к оперным театрам, аурализацию можно использовать для анализа акустических свойств различных существующих залов и моделирования еще не построенных театров. Это чрезвычайно ценно как для сохранения залов (при возможной реставрации), так и для проектирования новых оперных залов. Новую технологию можно использовать для оценки влияния различных элементов звукопоглощающих конструкции на качество звучания, в практике обучения исполнителей, в том числе для получения возможности предварительного прослушивания различных видов исполнения в залах с разной акустикой.

Рассмотренные в данной статье методы моделирования акустического пространства позволяют проектировать залы высокого акустического качества. В качестве примера зала оперного театра, построенного с использованием современных технологий, мож-

но привести зал Мариинского театра–2. Его зрительный зал имеет традиционную для оперных театров изогнутую форму (Horseshoe Shape). Стены лож и балконы округлой формы выложены резными облицовочными панелями из бука. В партере и на балконах дубовые полы установлены на деревянной опоре. Объем зала — 18000 м<sup>3</sup>, время реверберации на средних частотах 1.6–1.7 с. Для сравнения, театр Ла Скала, Милан имеет объем зала 11252 м<sup>3</sup>, а время реверберации — 1,24 с; в Метрополитен Опере (Нью-Йорк) объем зала равен 24724 м<sup>3</sup>, а время реверберации на средних частотах — 1,47 с [8, с. 76].

При проведении акустических тестов, оценивавших как объективные, так и субъективные характеристики акустики зала, эксперты сошлись во мнении, что звук в зале оперного театра чистый и сбалансированный. По результатам проведенных исследований было технически подтверждено высокое акустическое качество зала. Таким образом, современные достижения архитектурной акустики, создание новых методов компьютерного моделирования позволяют поднять проектирование современных оперных театров на новый уровень качества.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Алдошина И. А., Приттс Р.* Музыкальная акустика. СПб.: Композитор, 2006. 720 с.
2. *Кузнецова А. И.* История изучения акустических пространств оперных театров: материалы VIII Всерос. науч.-практ. конференции, 26 марта 2016 г. СПб.: СПбГУП, 2016. С. 73–75.
3. *Макриненко Л. И.* Акустика помещений общественных зданий. М.: Стройиздат, 1986. 173 с.
4. *Ballou G.* Handbook for Sound Engineers. Fifth edition. N.Y. & L.: Focal Press, 2015. 1798 p.
5. *Beranek L.* Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. N.Y.: Springer, 2004. 661 p.
6. *Ballou G.* Handbook for Sound Engineers. Fourth edition. MA: Focal Press, 2008. 1778 p.
7. *Рустамов А. Р.* Звуковой образ пространства в структуре художественного языка звукорежиссуры: дис. канд. искусств. СПб., 2013. 195 с.
8. *Кузнецова А. И.* Современные компьютерные методы проектирования оперных залов: IX Всерос. науч.-практ. конференция, 25 марта 2017 г. СПб.: СПбГУП, 2017. С. 74–76

#### REFERENCES

1. *Aldoshina I. A., Pritts R.* Muzykal'naya akustika. SPb.: Kompozitor, 2006. 720 s.
2. *Kuznetsova A. I.* Istoriya izucheniya akusticheskikh prostranstv opernykh teatrov: materialy VIII Vseros. nauch.-prakt. konferentsii, 26 marta 2016 g. SPb.: SPbGUP, 2016. S. 73–75.
3. *Makrinenko L. I.* Akustika pomeshchenii obshchestvennykh zdaniy. M.: Stroiizdat, 1986. 173 s.
4. *Ballou G.* Handbook for Sound Engineers. Fifth edition. N.Y.: Focal Press, 2015. 1798 p.
5. *Beranek L.* Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. N.Y.: Springer, 2004. 661 p.
6. *Ballou G.* Handbook for Sound Engineers. Fourth edition. MA: Focal Press, 2008. 1778 p.
7. *Rustamov A. R.* Zvukovoi obraz prostranstva v strukture khudozhestvennogo yazyka zvukorezhissury: dis. kand. iskusstv. SPb., 2013. 195 s.

8. *Kuznetsova A. I.* Sovremennye komp'yuternye metody proektirovaniya opernykh zalov: IX Vseros. nauch.-prakt. konferentsiya, 25 marta 2017 g. SPb.: SPbGUP, 2017. S. 74–76

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

А. И. Кузнецова — KuznetsovaAI@hotmail.com

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Anna I. Kuznetsova — KuznetsovaAI@hotmail.com