

К проблеме мониторинга микротоновых изменений в звучании колоколов

Звуковысотное положение обертонов колокола в большинстве случаев рассматривается как константа. Оно не меняется на протяжении звучания и не зависит от силы удара, либо других исполнительских приемов. Если в отдельных случаях при более сильном ударе слышимая высота звучания колокола повышается или понижается, это связано лишь с тем, что в спектре более отчетливо проявляются обертоны, которые при слабом ударе были не столь явными (вероятно, подобное было отмечено в селе Новоспасском, на родине М. И. Глинки¹). Тем не менее, ряд факторов — реально или гипотетически — способен повлиять на частоты обертонов колокола.

Среди них следует назвать, во-первых, температуру. Описывая одно из исполнений «Ночи на Лысой горе» М. П. Мусоргского, Н. А. Римский-Корсаков указывает, что «пришлось <...> заменить тамтамом колокол. Он был выбран <...> в колокольной лавке, а в зале оказался нестройным вследствие изменения температуры»². Во-вторых, в последние десятилетия отечественными исследователями высказывалось предположение об изменении звучания колоколов вследствие их старения. Впервые с этой идеей выступили сотрудники Московского колокольного центра³. Позднее звонарь и исследователь К. А. Мишуров-

¹ В. Ф. К юбилею М. И. Глинки // *Нива*. 1904. № 22. С. 440; Фрагмент статьи, посвященный колоколам села Новоспасское, см. также в: *Канн-Новикова Е. М. И. Глинка. Новые материалы и документы*. М.; Л., 1950. Вып. 1. С. 38.

² *Римский-Корсаков Н. А. Летопись моей музыкальной жизни*. 1844–1906. СПб., 1909. С. 245.

³ *Шариков В. Г., Ходорич А. Б., Горкина А. Н. Звучание колоколов и время // Протоиерей Аристарх Израилев (1817–1901). Труды, публикации, исследования*. М., 2001. С. 743–

ский подверг сомнению их выводы⁴. Таким образом, данная проблема лежит в дискуссионном поле. В-третьих, при производстве колоколов настройка их звучания может производиться посредством механической обработки. Подобное характерно, в первую очередь, для западной традиции, где в этой области накоплен богатый опыт, отраженный в литературе⁵. В данной статье этот фактор рассматриваться не будет, однако методы оценки изменений в звучании колоколов, которым посвящена статья, актуальны во всех трех случаях.

Упомянутые факторы в большинстве случаев вызывают весьма незначительные изменения в высоте звучания, которые измеряются в сотых долях полутона — центах равномерно-темперированного строя. В связи с этим предъявляются особые требования как к исследовательской звукозаписи, так и к анализу аудиоматериалов. Аудиозапись должна проводиться таким образом, чтобы исключить или свести к минимуму все погрешности, в связи с которыми звук, зафиксированный на носителе, может отличаться по высоте от того, который звучал в реальности. Один из распространенных источников такой погрешности — неточная регулировка скорости прокрутки пленки в магнитофоне. К примеру, компактные катушечные магнитофоны, которыми в 1970–1980-е гг. пользовались при полевых исследованиях советские фольклористы и кампанологи, согласно технической документации, могли давать погрешность в скорости прокрутки пленки до 2%⁶, что должно вызывать отклонения по высоте звучания более 30 центов. На практике при изношенном лентопротяжном механизме эти погрешности могли быть заметно больше. В то же время магнитофоны студийного класса могли иметь значительно более точную регулировку. При анализе архивных аудиозаписей вопрос о возможных погрешностях должен решаться индивидуально, исходя из технических характеристик магнитофона и, в идеале, информации о его техническом состоянии на момент записи.

755; см. также: Гусева А. Н. Православный звон: опыт музыкально-акустического исследования. М., 2010. С. 203–206; Гусева А. Н. Русский колокол как музыкальный феномен: Дисс. соиск. док. исск. М., 2011. С. 203–206.

⁴ Мишуровский К. А. Специфическое благозвучие колоколов большой ростовской соборной звонницы // История и культура Ростовской земли. 2007. Ростов, 2008. С. 219–220.

⁵ Rossing T. D. The acoustics of bells // *American Scientist* Vol. 72 (5), September–October 1984. P. 445–446; Lehr A. A. statistical investigation of Historical Swinging Bells in West Europe // *Acustica, International journal on Acoustics*, Vol. 74 (1991). P. 103–105.

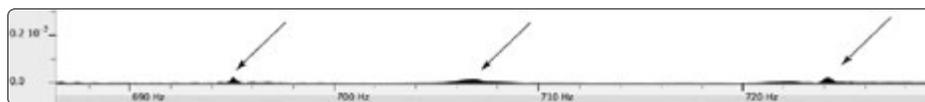
⁶ Феорид Г. Магнитофон «Репортер-6» // Радио. 1971. № 7. С. 57; Магнитофон «Романтик». Краткое описание и инструкция по эксплуатации. Балахна, 1968. С. 4.

Гораздо более надежным источником является цифровая запись, сделанная посредством портастудии, компьютера со звуковой картой, компактного рекордера, минидискового плеера и др. Запись в форматах РСМ (aiff, aif, wav и др.) осуществляется на одной из стандартных частот дискретизации. Чаще всего это 44 100, 48 000, 88 200, 96 000 или 192 000 Гц. Это число говорит о том, сколько раз в секунду производятся замеры амплитуды звука. Числа, соответствующие значениям амплитуды, одно за другим записываются на носитель, в результате чего звуковая волна фиксируется в цифровом виде. Эти числа называются сегментами файла или семплами. Если частота дискретизации в реальном устройстве будет отклоняться от указанной, это даст эффект, аналогичный ускорению или замедлению прокрутки пленки. Используемые в цифровых звукозаписывающих устройствах кварцевые генераторы отличаются высокой стабильностью. Отклонения по частоте у них редко превышают 0,001%, что может привести к искажению высоты в записи лишь на сотые или тысячные доли цента.

Еще один источник погрешности — эффект Доплера. Он может возникнуть, во-первых, если микрофон находится в движении относительно колокола. Соответственно, необходимо следить, чтобы он был закреплен неподвижно. К примеру, некоторые звукорежиссеры при организации записи колоколов подвешивают микрофоны, перекидывая провод через балку колокольни. При этом микрофоны может раскачивать ветер. Для отслеживания микротоновых изменений в звучании колоколов микрофон лучше всего зафиксировать на штативе. Однако даже это не позволяет исключить эффект Доплера вследствие раскачивания самих колоколов. Данная проблема решается за счет настроек анализатора, которые будут рассмотрены ниже.

Наиболее распространенный алгоритм, применяемый для спектрального анализа цифровых аудиозаписей — Быстрое преобразование Фурье (БПФ). В исследованиях колоколов он применяется с 1970-х гг.⁷ по сей день. В зависимости от задач, которые ставит перед собой исследование, необходимо выбрать правильные настройки анализатора. Наиболее важным параметром является длина анализируемого фрагмента звука (FFT size, размер БПФ). Она составляет то или иное число сегментов РСМ-файла, которое во всех случаях равно $2n$. Обычно оно колеблется от $256 = 2^8$ до $524\,288 = 2^{19}$ семплов. Чем короче взя-

⁷ *Greenhough M. The analysis and synthesis of bell sounds // Proceedings of the Institute of Acoustics, sept. 1976, p. 3-4-1 to 3-4-4.*



Ил. 1. Нечеткое отображение на спектрограмме тонов малой протяженности

тый отрывок, тем больше цена деления шкалы анализатора, тем менее точным будет анализ. Кроме того, шкала анализатора, основанного на БПФ, линейная. Она измеряет не высоту звука в полутонах, а частоту в Гц. Звуковвысотная шкала находится по отношению к ней в логарифмической зависимости. Это значит, что в зоне До большой октавы полутон составляет порядка 4 Гц, а в зоне До первой октавы — порядка 16 Гц. Тогда, если шаг шкалы анализатора приблизительно равен 3 Гц, то в первом случае внутри полутона можно выявить в лучшем случае две микротоновые градации, а внутри второго — пять или шесть.

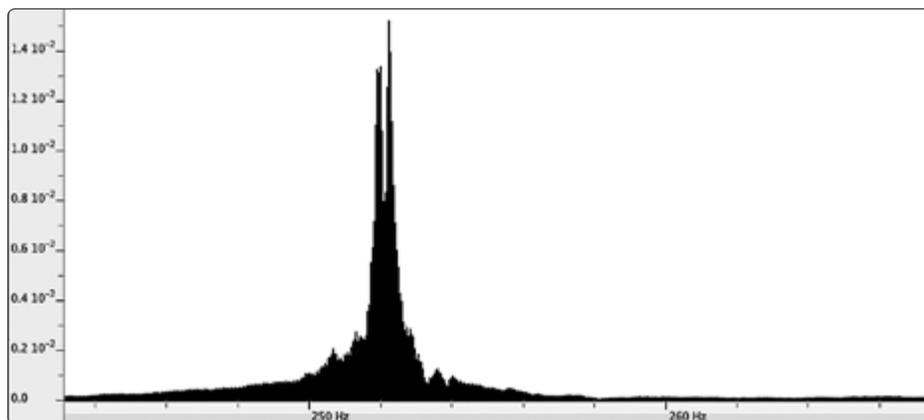
Цена деления шкалы анализатора вычисляется по формуле $N/2M$, где N — частота дискретизации файла, а M — размер БПФ в семплах. Из таблицы 1 видно, что если мы хотим выявить центовые отклонения в звучании гигантских колоколов, нижние тоны которых находятся в малой октаве или контроктаве, нам нужно взять фрагмент звука длиной порядка 22 секунд (к примеру, 1 048 576 семплов при частоте дискретизации 48 кГц). В других случаях также целесообразно использовать длительные отрезки звука — не менее 5,5–6 секунд (262 144 семпла при частоте 44,1 кГц или 48 кГц), что обеспечит необходимую точность анализа. Также из таблицы 1 видно, что при указанных частотах дискретизации размер БПФ менее 16384 семплов для анализа микротоновых отклонений непригоден.

Большая протяженность анализируемого фрагмента звука, помимо прочего, позволяет компенсировать искажения, возникающие вследствие эффекта Доплера, так как за несколько секунд раскачивающийся при ударах колокол, как правило, успевает совершить несколько движений в противоположных направлениях. Идеальным решением данной проблемы видится анализ усредненного спектра фонограммы, которая включает в себя несколько ударов в исследуемый колокол, и протяженность которой составляет одну или даже несколько минут. При таких настройках для анализа годятся только наиболее устойчивые нижние тоны спектра. Чем быстрее угасает тон, тем менее четко он будет отображаться на спектрограмме, тем выше вероятность, что его частота будет определена ошибочно (ил. 1).

Во многих случаях спектральные тоны колоколов звучат с биениями. На спектрограмме каждый такой тон разделяется на два, близкие по частоте

Таблица 1. Цена деления шкалы спектрального анализатора при различной длине анализируемого фрагмента

Размер БПФ (семплы)	Длина анализируемого отрывка (миллисек.)	Цена деления шкалы анализатора (Гц)	Цена деления шкалы анализатора на высоте До большой октавы (центы)	Цена деления шкалы анализатора на высоте До первой октавы (центы)	Цена деления шкалы анализатора на высоте До третьей октавы (центы)
Частота дискретизации 44100 Гц					
256	5,80	86,1328125	1454,63	492,72	136,94
512	11,61	43,06640625	875,80	263,84	69,83
1024	23,22	21,53320313	492,70	136,96	35,27
2048	46,44	10,76660156	263,82	69,85	17,73
4096	92,88	5,383300781	136,93	35,29	8,90
8192	185,76	2,691650391	69,82	17,75	4,46
16384	371,52	1,345825195	35,26	8,91	2,24
32768	743,04	0,672912598	17,72	4,48	1,13
65536	1486,08	0,336456299	8,88	2,25	0,57
131072	2972,15	0,168228149	4,45	1,14	0,29
262144	5944,31	0,084114075	2,23	0,59	0,15
524288	11888,62	0,042057037	1,11	0,31	0,08
1048576	23777,23	0,021028519	0,56	0,17	0,05
Частота дискретизации 48000 Гц					
256	5,33	93,75	1539,53	530,23	148,54
512	10,67	46,875	935,54	285,35	75,87
1024	21,33	23,4375	530,21	148,56	38,36
2048	42,67	11,71875	285,32	75,89	19,29
4096	85,33	5,859375	148,53	38,37	9,68
8192	170,67	2,9296875	75,86	19,31	4,85
16384	341,33	1,46484375	38,35	9,70	2,43
32768	682,67	0,732421875	19,28	4,87	1,22
65536	1365,33	0,366210938	9,67	2,45	0,62
131072	2730,67	0,183105469	4,84	1,24	0,32
262144	5461,33	0,091552734	2,42	0,64	0,16
524288	10922,67	0,045776367	1,21	0,33	0,09
1048576	21845,33	0,022888184	0,61	0,18	0,05



Ил. 2. Тон с биениями на спектрограмме

(ил. 2). В таких случаях, если мы анализируем несколько спектрограмм с целью выявить микротоновые различия, необходимо изначально условиться, рассматриваем ли мы обе частоты, либо только верхнюю, либо только нижнюю.

С учетом указанных требований был сделан и проанализирован ряд аудиозаписей колокольных звонов московского храма Святителя Николая Мирликийского в Кузнецкой слободе (т. н. Никола в Кузнецках). Записи производились летом 2014 г., а также в феврале и марте 2015 г. при различных погодных условиях.

Данное исследование ставило две цели:

1) опробовать на практике цифровую аудиозапись и ее спектральный анализ на основе БПФ как средство мониторинга микротоновых изменений в звучании колоколов;

2) определить зависимость звуковысотных параметров колоколов от температуры.

Аудиозапись делалась на портативный рекордер Zoom H4n с частотой дискретизации 96 кГц и глубиной семплирования 24 бита. Для спектрального анализа использовалась программа Amadeus Pro 2.1. В настройках анализатора выставлялся размер БПФ в 524 288 семплов, а частота дискретизации снижалась до 48 кГц. Таким образом, шаг шкалы анализатора составлял 0,045 776 Гц. Для снижения погрешностей при отображении спектра использовалась оконная функция Блэкмана. Температура воздуха во время записи определялась лабораторным ртутным термометром с диапазоном измерений от -36 до $+52$ °С.

Для исследования были выбраны три колокола храма. Один из них — современного литья фирмы ЗИЛ, высота — 126 см, нижний диаметр — 97 см,

Таблица 2. Зависимость высоты звучания спектральных тонов колокола фирмы ЗИЛ от температуры

t, С°	Тон 1		Тон 2		Тон 3	
	Частота, Гц	Высота	Частота, Гц	Высота	Частота, Гц	Высота
-1,5	191,802979	54,6255	389,282227	66,8798	491,409302	70,9131
2	191,665649	54,6131	389,007568	66,8675	491,088867	70,9018
9	191,390991	54,5882	388,549805	66,8472	490,447998	70,8792
12,2	191,299438	54,5799	388,275146	66,8349	490,127563	70,8678
12,6	191,299438	54,5799	388,229370	66,8329	490,081787	70,8662
15,0	191,253662	54,5758	388,000488	66,8227	489,852905	70,8581
18,2	191,024780	54,5551	387,680054	66,8084	489,395142	70,8420
22,1	191,024780	54,5551	387,725830	66,8104	489,349365	70,8403
23,0	190,933228	54,5468	387,496948	66,8002	489,166260	70,8339
23,8	190,933228	54,5468	387,405396	66,7961	489,166260	70,8339
32,5	190,612793	54,5177	386,810303	66,7695	488,250732	70,8014

Таблица 3. Зависимость высоты звучания спектральных тонов колокола без надписей от температуры

t, С°	Тон 1		Тон 2		Тон 3	
	Частота, Гц	Высота	Частота, Гц	Высота	Частота, Гц	Высота
-1,5	228,103638	57,6262	443,572998	69,1400	551,513672	72,9107
2	227,874756	57,6089	443,29834	69,1293	551,055908	72,8963
9	227,600098	57,5880	442,611694	69,1025	550,323480	72,8733
12,2	227,371216	57,5706	442,108154	69,0827	549,682617	72,8531
12,6	227,371216	57,5706	442,108154	69,0827	549,682617	72,8531
15,0	227,325439	57,5671	442,062378	69,0810	549,636841	72,8517
18,2	227,142334	57,5531	441,741943	69,0684	549,224854	72,8387
22,1	226,867676	57,5322	441,101074	69,0433	548,583984	72,8185
23,0	226,959229	57,5392	441,329956	69,0522	548,767090	72,8243
23,8	226,913452	57,5357	441,146851	69,0451	548,629761	72,8200
32,5	226,501465	57,5042	440,551758	69,0217	547,714233	72,7910

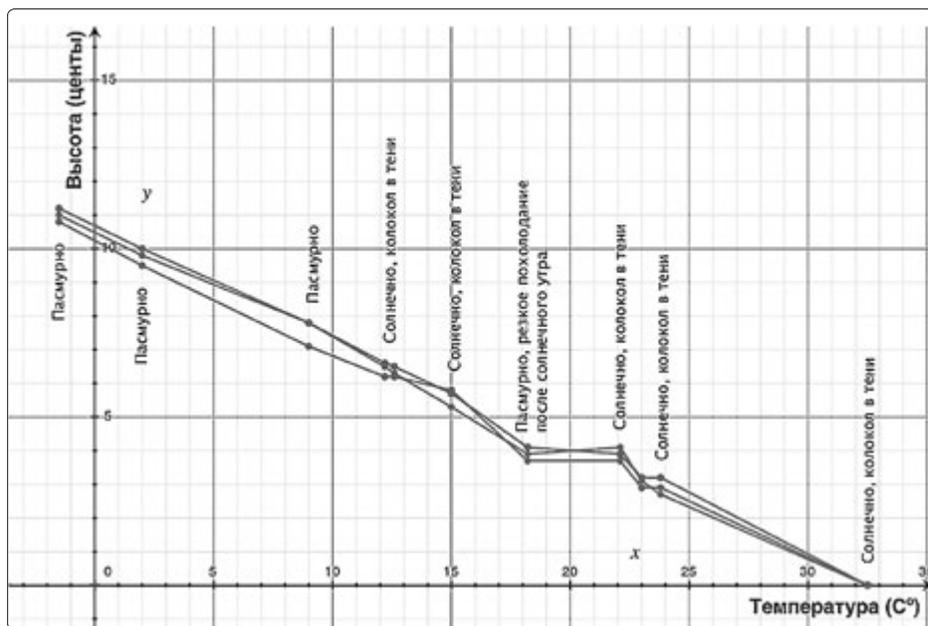
Таблица 4. Зависимость высоты звучания спектральных тонов колокола завода Финляндского от температуры

t (С°)	Тон 1		Тон 2	
	Частота, Гц	Высота	Частота, Гц	Высота
-1,5	295,120239	62,0856	578,979492	73,7521
2	294,845581	62,0695	578,430176	73,7357
9	294,342041	62,0399	577,560425	73,7096
12,2	293,930054	62,0156	576,370239	73,6739
12,6	293,838501	62,0102	576,187134	73,6684
15,0	293,289185	61,9778	575,454712	73,6464
18,2	293,792725	62,0075	576,187134	73,6684
22,1	292,510986	61,9318	573,944092	73,6009
23,0	292,602539	61,9373	574,081421	73,6050
23,8	292,465210	61,9291	573,715210	73,5940
32,5	292,739868	61,9454	574,218750	73,6092

висит в северном пролете колокольни. Другой — колокол без надписей, судя по внешнему виду и особенностям декора, отлит в XVIII — начале XX в., висит в глубине колокольни, ближе к восточному пролету. Его высота — 75 см, нижний диаметр — 74 см. Третий — колокол московского завода Финляндского расположен в левой части восточного пролета колокольни, его высота 55 см, нижний диаметр — 53 см, гравированное указание веса — 5 пудов, 12 фунтов. Судя по тому, что на колоколе изображены две медали с государственным гербом России, он был отлит между 1882 и 1896 гг. (до этого у завода была только одна медаль, позднее им была получена третья)⁸.

В ходе анализа было исследовано 12 аудиозаписей звонков Никольского храма, сделанных при разной температуре. У колокола фирмы ЗИЛ и колокола без надписей рассматривались частоты трех нижних тонов спектра, у колокола завода Финляндского — двух нижних тонов. Для каждой из вычис-

⁸ Москвичева Ю., Азарова О. Московский колоколотейный завод Финляндского [электронный ресурс] URL: <http://www.zvon.ru/article3.view2.page4.part16.html> (дата обращения 15.03.2015).

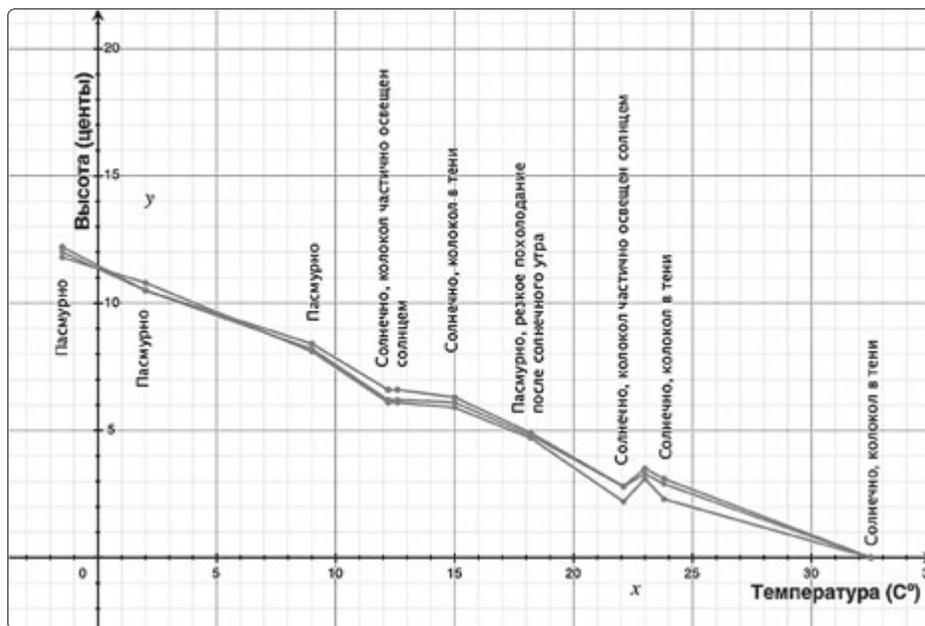


Ил. 3. График зависимости высоты звучания трех нижних спектральных тонов колокола фирмы ЗИЛ от температуры воздуха

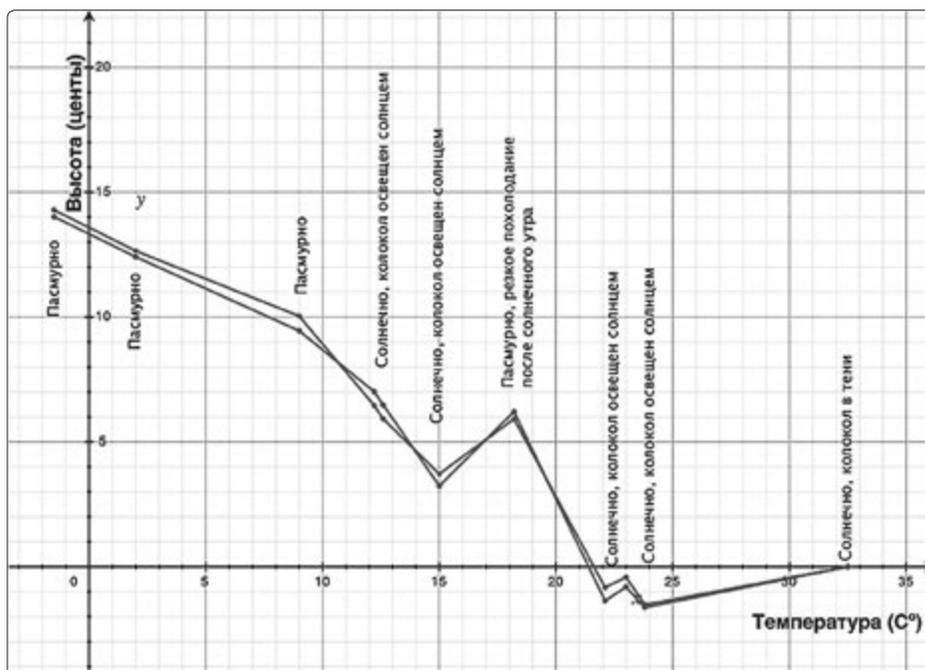
ленных частот была установлена высота по равномерно-темперированной шкале, выраженная в числах согласно стандарту General Midi, где нота Ля первой октавы (440 Гц) равна 69,0, нота До первой октавы (261,6 256 Гц) равна 60,0 и т. д. В результате были составлены три таблицы, показывающие зависимость высоты звучания рассматриваемых колоколов от температуры.

На основании этих таблиц были построены графики относительного изменения высоты звучания, в которых за нулевую точку принята высота каждого из тонов при 32,5 C°.

Из графиков (ил. 3–5) видно, что высота разных тонов одного колокола изменяется в зависимости температуры практически параллельно. Расхождения во всех случаях менее одного цента и носят случайный характер. Вероятно, они связаны с погрешностями анализатора. Все неровности графиков, несомненно, связаны с расхождением между температурой колоколов и температурой окружающей среды. Наиболее ровный график у колокола фирмы ЗИЛ, который расположен таким образом, что во всех случаях был закрыт от прямых солнечных лучей. Единственная неровность графика возникла при температуре 18,2 C°. Запись при этой температуре сделана 17 августа 2014 г. К моменту записи резко похолодало, но незадолго до того стояла теп-



Ил. 4. График зависимости высоты звучания трех нижних спектральных тонов колокола без надписей от температуры воздуха



Ил. 5. График зависимости высоты звучания двух нижних спектральных тонов колокола завода Финляндского от температуры воздуха

лая солнечная погода, и, вероятно, достаточно большой колокол фирмы ЗИЛ еще не успел остыть до температуры окружающего воздуха.

Наибольшие отклонения от прямой линии заметны на графике с данными по колоколу завода Финляндского. Благодаря своему расположению на колокольне, в первой половине дня при ясной погоде он освещен солнцем, в результате чего сильно нагревается. В меньшей степени подвержен этому колокол без надписей, который висит в глубине колокольни, в результате чего в первой половине дня солнце освещает лишь небольшую часть его поверхности. Если же рассматривать данные, полученные при стабильной температуре воздуха в пасмурную погоду, либо тогда, когда колокола находились в тени, точки всех трех графиков с незначительной погрешностью лягут на прямые линии. Эти линии показывают, что при повышении температуры на 10 градусов высота звучания колокола фирмы ЗИЛ опустится на 3,2 цента, колокола без надписей — на 3,6 цента, колокола завода Финляндского — на 4,15 цента (то, что колокола несколько по-разному реагируют на изменение температуры, может объясняться разницей в составе бронзы, из которой они отлиты).

Таким образом, приведенное в начале статьи наблюдение Н. А. Римского-Корсакова, согласно которому колокол, попав из колокольной лавки в концертный зал, «оказался нестройным вследствие изменения температуры»⁹, могло соответствовать действительности. В первой половине октября 1886 г., когда шли репетиции оркестра, температура в Санкт-Петербурге колебалась от -1 до $+11,2$ С°¹⁰. Если колокол выбирался в холодный день на открытом воздухе, а затем попал в отапливаемое помещение, его температура могла измениться на 20 и более С°, а высота звучания — на 6–10 центов. Нельзя также исключать и другие гипотезы, связанные с психоакустическими проблемами восприятия высоты звучания колокола, так как точная температура, при которой покупался колокол, неизвестна.

В целом же исследование, проведенное на колокольне Никольского храма, показывает, что технологии, связанные с цифровой аудиозаписью и анализом на основе БПФ, могут успешно применяться для мониторинга микро-тоновых изменений в звучании колоколов. Речь идет не только о тех из них, которые вызваны изменением температуры, но и о тех, которые, предполо-

⁹ *Римский-Корсаков Н. А.* Летопись. С. 245.

¹⁰ По данным архива ВНИИГМИ. Специализированные массивы для климатических исследований [электронный ресурс] URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения 15.03.2015).

жительно, могут происходить вследствие старения колоколов. На данный момент гипотеза о таких изменениях основана исключительно на сопоставлении современных данных спектрального анализа с измерениями, сделанными о. Аристархом Израилевым в последней трети XIX в. посредством набора камертонов¹¹. Эти измерения касаются только одного колокольного набора — знаменитой ростовской Успенской звонницы, — а их интерпретация связана с рядом проблем. Так, например, современный спектральный анализ для каждого из колоколов дает множество частот различных обертонов, тогда как в исследовании о. Аристарха звучанию одного колокола соответствует только одна частота. Следовательно, возникает вопрос о том, с какими из обертонов следует сопоставлять частоты, определенные Израилевым.

Для проверки и уточнения гипотезы об изменении высоты звучания колоколов с течением времени необходимы дальнейшие исследования. В частности, это может быть серия измерений, аналогичных тем, которые были проведены в 2014–2015 гг. на колокольне храма Николая Мирликийского в Кузнецкой слободе. По предположениям сотрудников Московского колокольного центра, звучание некоторых колоколов за сто лет может опуститься более чем на 2 полутона¹². Следовательно, за промежуток в несколько лет следует ожидать изменений в звучании на несколько центов, которые могут быть зафиксированы посредством описанных в данной статье аналитических приемов. При этом должны соблюдаться следующие условия:

Для исследуемых колоколов должен быть установлен коэффициент, показывающий зависимость высоты звучания от температуры.

Исследовательская аудиозапись должна сопровождаться измерением температуры воздуха. Колокола должны быть защищены от прямых солнечных лучей. Также возможно использование контактных датчиков температуры, которые будут закрепляться на поверхности колокола.

Для компенсации возможных погрешностей анализа выводы должны делаться на материале анализа нескольких аудиозаписей, сделанных последовательно с разницей в один год или более.

¹¹ *Израилев А. А.* Ростовские колокола и звоны // Музыка колоколов / Отв. ред., сост. А. Б. Никаноров. СПб., 1999. С. 152–162.

¹² *Шариков В. Г., Ходорич А. Б., Горкина А. Н.* Звучание колоколов и время // Протоирей Аристарх Израилев (1817–1901). Труды, публикации, исследования. М., 2001. С. 743–755.; см. также: *Гусева А. Н.* Православный звон ... С. 203–206; *Гусева А. Н.* Русский колокол ... М., 2011. С. 203–206.

Идеальным средством видится создание специального аудиорахива, в котором будут храниться цифровые аудиозаписи колоколов и звонов за разные годы с точным указанием времени и погодных условий, при которых они были сделаны. Преимущество такого архива перед разного рода акустическими паспортами, распечатанными на бумаге, в том, что при сравнительном анализе исследователь будет волен выбирать алгоритм анализа и настройки анализатора, исходя из поставленных задач. Не исключается также работа с уже существующими акустическими паспортами и аудиоархивами. К сожалению, на данный момент не удалось обнаружить архивных аудиозаписей колоколов, для которых можно было бы достоверно установить точную температуру воздуха, при которой они были сделаны.