

С. Е. Шевцов*, Е. А. Мазур

Колледж русской культуры им. А. С. Знаменского, г. Сургут, e-mail: ork-hmao@mail.ru

**Уральская государственная консерватория им. М. П. Мусоргского, г. Екатеринбург, e-mail: s_shevtsov@mail.ru*

Акустика тобольского Софийско-Успенского собора

Получена 21.03.2016, опубликована 23.06.2016

В работе описаны результаты акустического обследования Софийско-Успенского кафедрального собора города Тобольска, древнейшего в Сибири и на Дальнем Востоке храма. Исследованы обработанные данные акустических параметров согласно международному стандарту ISO-3382 в ситуациях пустого и наполненного храма. Ставятся вопросы влияния наполненности храма прихожанами на акустические параметры разборчивости речи. Затрагиваются акустические феномены, связанные со спецификой русской православной церкви.

Ключевые слова: акустическое обследование, акустика православной церкви.

ВВЕДЕНИЕ

Софийско-Успенский кафедральный собор в городе Тобольске является самым древним, одним из самых крупных и высоких сооружений такого рода, построенных в Сибири и на Дальнем Востоке. Освящен в 1683 г. Высота без центрального купола равна 16,8 м, высота купола — 27,6 м. Большим является значение удельного объема, приходящееся на обычное для этого храма число прихожан, примерно равное 50 человек, которое составляет более 100 куб. м.. Это связано с тем, что площадь пола без алтаря небольшая, всего 270 кв. м. При этом часть, занимаемая прихожанами, составляет только половину площади. Остальное пространство, это отгороженный клирос, протяженная солея. Пространство храма теснят четыре массивные колонны, толщина которых достигает более 3 м. Две из них находятся уже во внутреннем пространстве алтаря. В настоящее время собор действующий (см. рис. 1,2). Цель исследования — зафиксировать акустические свойства и найти взаимосвязь между акустическими характеристиками пустого и наполненного храма в рамках поиска феноменов звуковой среды православных храмов.

1. ХОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве источника звука использовался ненаправленный излучатель — установленный на высоте 1,6 м от пола и в трёх с половиной метрах от алтаря (см.

рис. 3). Также использовались позиции в алтаре и на клиросе. Тип измерительного сигнала: Sweep sine tone, белый шум с MLS последовательностью. Микрофон устанавливался на отметке 1,6 м от пола в 9 разных точках (см. рис. 4).

Приемные позиции располагались по одной стороне помещения в силу того, что в плане оно является симметричным.



Рис. 1. Участники исследования



Рис. 2. Внешний вид храма



Рис. 3. Приемная позиция №1. Вид со стороны клироса

2. АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, РАССМАТРИВАЕМЫЕ В ДАННОМ ИССЛЕДОВАНИИ

В исследовании измерялись и рассматривались следующие акустические параметры: время реверберации RT_{-30} с (субъективный коррелят параметра RT — «полетность» звука, «жизненность»); индексы ясности музыкальной фактуры и разборчивости речи: C_{-80} , D_{-50} , STI ; сила звука G ; временной промежуток между прямым сигналом и первыми отражениями $IDTG$ (этот параметр определяет возникновение эхо и окраску звука и коррелирует с субъективным параметром «интимность»); боковая доля отраженной энергии LF (субъективный коррелят параметра — пространственное впечатление); индекс акустической «поддержки» музыкантов во время исполнения ST ($ST-1$, $ST-2$).

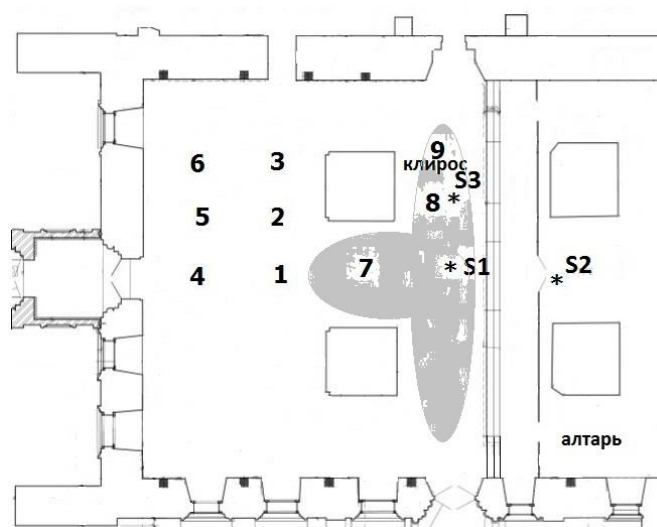


Рис. 4. Цифрами обозначены приемные позиции, звездами — позиции источника. Серым цветом обозначена зона удовлетворительной слышимости (источник $S1$)

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

3.1 Время реверберации RT_{-30} с

На рис. 5 указаны полученные параметры времени реверберации в пустом храме. 9 кривых соответствуют различному положению микрофона.

Мы видим, что в основном групповой характер кривых неравномерен, на низких частотах наблюдается спад в октавной полосе частот 125 Гц и в меньшей степени на 250 Гц. Вероятно, наибольшую роль в данном явлении играет деревянная конструкция иконостаса и перегородок с иконами, расположенных между колоннами. Это доски и бруски разного сечения, представляющие собой массивный каркас, обшитый плоскостями с иконописью. В такой конструкции возбуждаются колебания под действием внешнего источника в помещении, которые имеют резонансные частоты в обозначенной полосе. Таким образом, иконостас здесь представляет собой резонансный

звукопоглотитель. Определенную роль играют колонны и углубления окон, которые рожают дифракцию низкочастотных волн и рассеяние. Непосредственно на субъективной характеристике звучания данное обстоятельство отражаться существенно не может, так как в источниках сигналов — мужских голосах, низкая певческая форманта находится уже в области 300 Гц. Как известно, в православном храме не исполняется инструментальная музыка, в которой могут присутствовать более низкие тоны. Лишь восьмая позиция отличается небольшим подъемом на полосе 125 Гц. Эта приемная позиция на клиросе. Источник звука находится рядом, поэтому влияние помещения на сигнал выражено в меньшей степени. Наблюдаемый спад у всех кривых на высоких частотах типичен, в принципе, для любых крупных помещений.

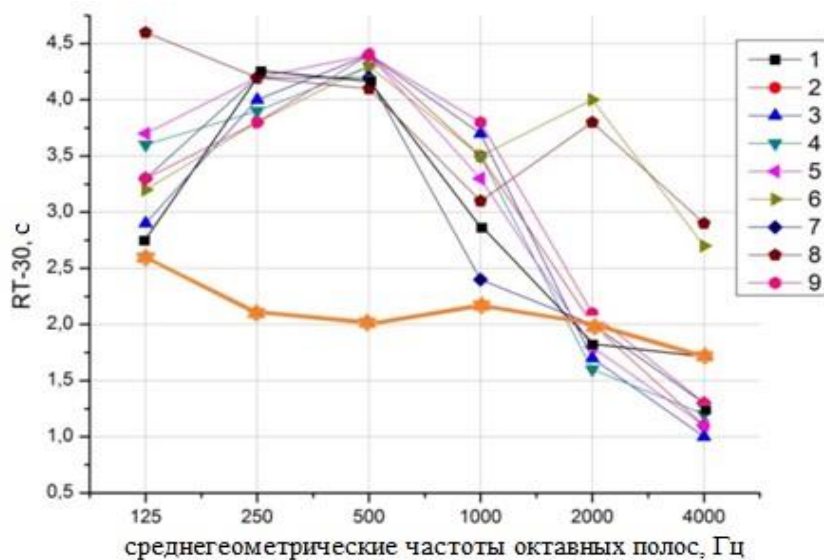


Рис. 5. Время реверберации RT-30 с, измеренное в храме. Оранжевая ломанная линия внизу — показатель в присутствии людей (хора). Цифрами обозначены приемные позиции. Источник по центру у алтаря (№ 1)

Рассмотрим время реверберации в сравнении: пустой храм и заполненный храм (приемная позиция № 1). При измерениях присутствовал хор в количестве 30 человек. Певчие были расставлены в шахматном порядке в месте обычного расположения прихожан, соблюдая дистанцию, равную одному метру. Таким образом, практически вся площадь храма, предназначенная для молящихся, была заполнена с наиболее оптимальной плотностью — 1 человек на 1 кв. м. В результате обработки данных обнаружено, что показатель времени реверберации значительно изменился, в сравнении со значением, которое было получено ранее в пустом храме, см. рис. 5. Во всяком случае, это справедливо в отношении приемной позиции № 1. С хором RT-30 равно 2,2 с, а в пустом храме этот показатель находится между тремя и четырьмя секундами (октавные полосы с центрами на 500 и 1000 Гц). При этом наличие людей поправило частотную зависимость реверберации: кривая стала более ровной. Отметим так же, что хотя разница в двух случаях большая, показатель, равный 2,2 с, указывает на то, что время реверберации сохраняется на довольно высоком уровне. Этот факт,

безусловно, влияет на субъективную оценку. Дело в том, что зачастую в храмах при заполнении прихожанами время реверберации существенно снижается, «полетность» звука теряется, и молитвенные песнопения уже не звучат в достаточной степени «возвышенно». Это характерно для храмов с пропорциями средней ширины к высоте (Ш, м./В, м) равной от 1,2 и более. Здесь же данная пропорция равна в среднем 0,3 с учетом вычета размеров колонн из общей ширины. То есть в Софийском соборе высота значительно превалирует над шириной. Примечательно, что рекомендация отечественного нормативного документа СНиП 23.03.2003 для залов ораторий и органной музыки по времени реверберации для помещений с подобным воздушным объемом (5350 куб. м.) составляет 2,1 с в заполненном зале. То есть акустика Софийско-Успенского собора практически соответствует официальному эталону хоровой музыки по времени реверберации.

3.2 «Ясность» C-80, дБ

Как указывалось ранее, этот параметр характеризует степень ясности звука, когда звучит музыка. В нашем случае большая часть православной службы состоит из напевов. Поэтому параметр актуален.

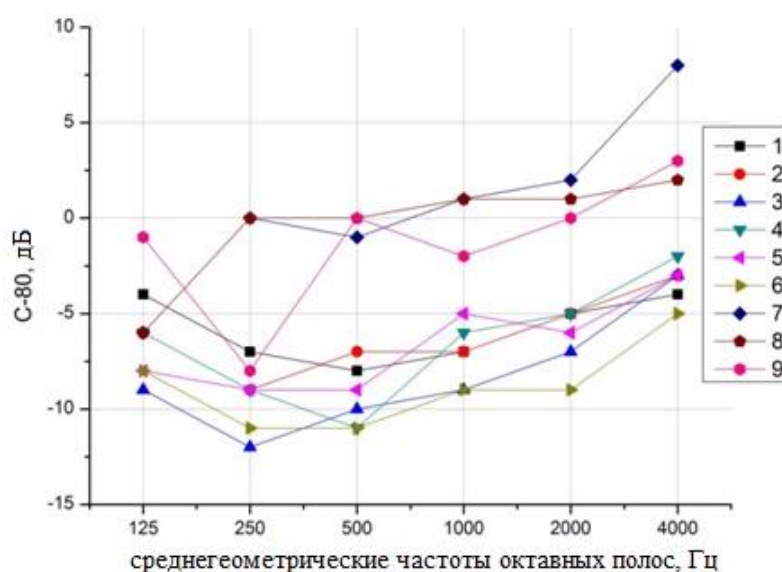


Рис. 6. Показатели C-80, дБ.

Источник в трех метрах от алтаря по центру (№ 1). Пустой храм

На рис. 6 изображены кривые по знакомым приемным позициям. Нас должна интересовать частотная область от 250 до 2000 Гц. Итак, здесь большинство позиций находятся ниже -5 дБ. При этом следует учесть, что напев священнослужителя в основном совершается лицом к алтарю и спиной к прихожанам. Это дополнительно должно снизить данные показатели. Они весьма низкие, так как нормой хорошей ясности звучания является значение не ниже -2 дБ [1]. Однако на позициях №№ 7, 8, 9 видим удовлетворительные значения — в районе 0 дБ. Они расположены вблизи

источника. Думается, что здесь стоящий спиной к прихожанам священник будет тоже слышен удовлетворительно. Речь идет о ситуации в пустом храме.

На рис. 7 показаны данные по наполненному храму. Поскольку разброс большой, это не дает возможности усреднить и совместить кривые на одном графике. Однако видно, что в целом ситуация мало изменилась в сравнении с пустым храмом.

Рассмотрим ситуацию, когда священник произносит молитву в алтаре. На рис. 8 изображены соответствующие кривые. Здесь о какой-либо ясности звучания говорить не приходится. Ситуация, когда врата открыты, изменяется не кардинально (см. рис. 9).

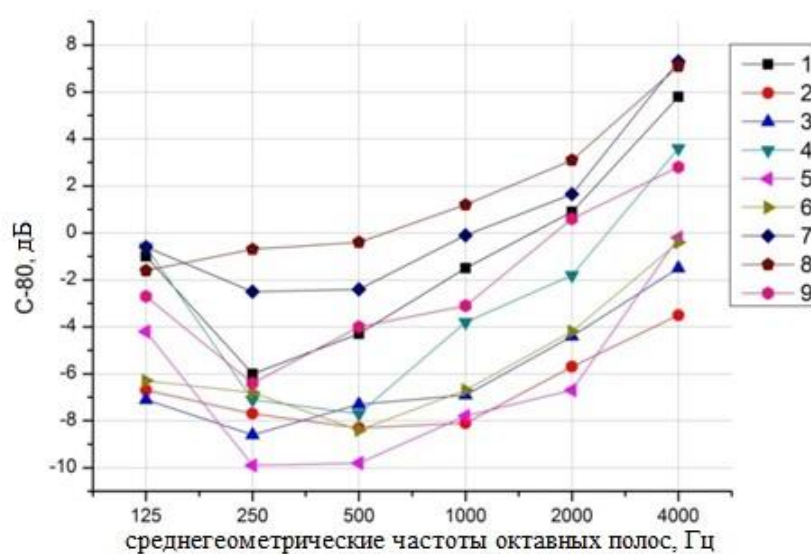


Рис. 7. Показатели C-80, дБ.

Источник в трех метрах от алтаря по центру (№ 1). Наполненный храм (30 человек)

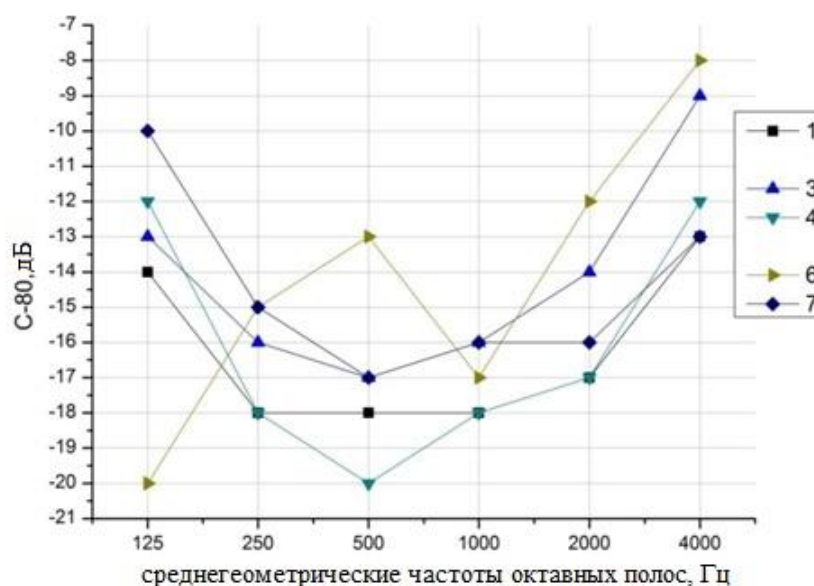


Рис. 8. Показатели C-80, дБ.

Источник находится в алтаре (№ 2). Врата закрыты

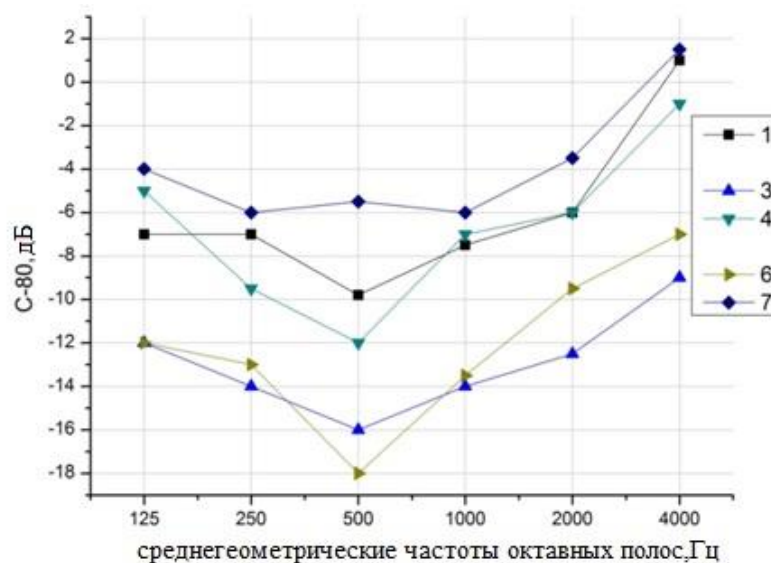


Рис. 9. Показатели C-80, дБ.

Источник находится в алтаре (№ 2). Врата открыты

3.3 «Разборчивость» D-50, %

В данном параметре оценивается разборчивость слов в речи. Ситуация повторяет характер показателей предыдущего параметра (см. рис. 10). Причем здесь так же не учтена направленность человека, обращенного к приемным позициям спиной. Область значений удовлетворительной разборчивости начинается примерно с 32% [2].

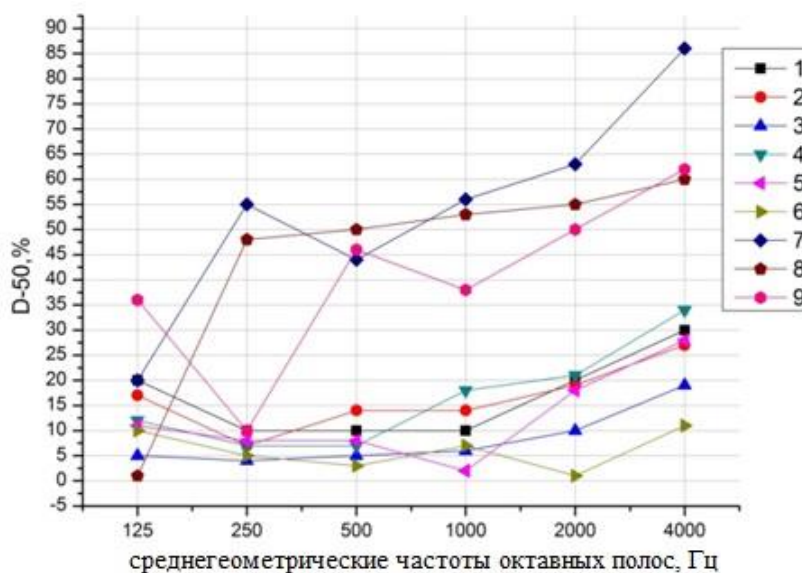


Рис. 10. Показатели D-50, %.

Источник в трех метрах от алтаря по центру (№ 1). Пустой храм

На рис. 11 показана ситуация с наполнением людьми. Заметно улучшение на приемных позициях № 1 и № 4.

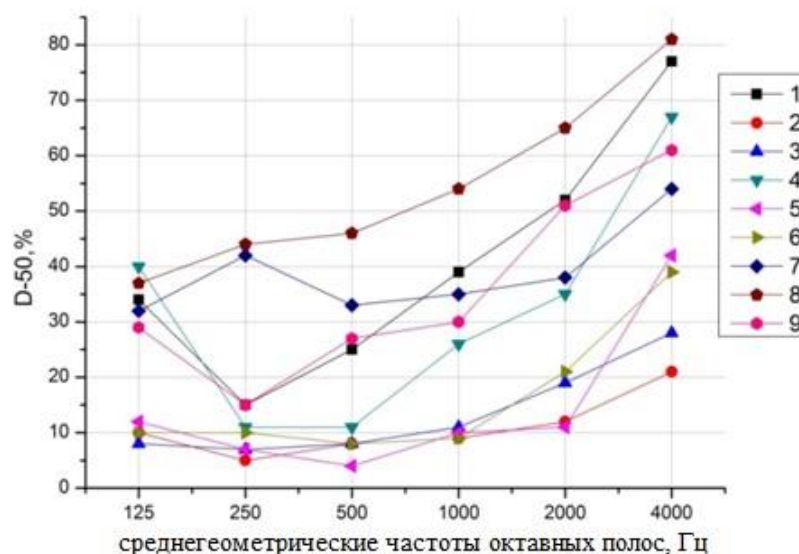


Рис. 11. Показатели D-50, %.

Источник в трех метрах от алтаря по центру (№ 1). Наполненный храм (30 человек)

Ситуация, когда источник звука в алтаре, не оставляет шансов на хорошую разборчивость слов (см. рис. 12).

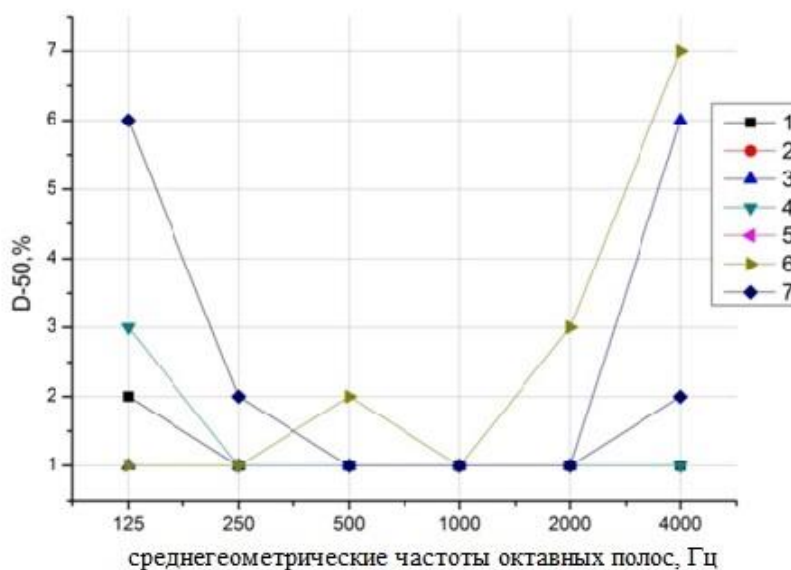


Рис. 12. Показатели D-50, %.

Источник находится в алтаре (№ 2). Врата закрыты

Впрочем, в алтаре произносятся тайные молитвы. Отдельные реплики предназначены прихожанам, и они обычно воспринимаются людьми даже при весьма слабых акустических показателях разборчивости речи.

Подводя итог, можно говорить о том, что при наполнении слушателями храма разборчивость улучшается на ближайших к источнику местах, а «теневые» зоны слышимости сохраняются. Такие зоны располагаются за колоннами, то есть вне прямой видимости священника и иконостаса.

Зона хорошей слышимости расположена соответственно в местах прямой видимости священников и иконостаса. Это зона между колоннами по центру и далее в обозначенном периметре (см. рис. 4). Зона слабой слышимости (приемные позиции 1-6) поменяется местами с противоположной зоной по качеству, если источник сместится к приемной позиции № 1.

Анализ С-80 и D-50, возможно, подтверждает мнение авторов данной работы о том, что в православной церкви задолго до существования электроакустического усиления бытовало и культивировалось хорошее знание прихожанами хода службы. Много было известно наизусть. Ибо только на небольшой площади службу можно услышать наверняка (при условии хорошей дикции у священнослужителя). На остальных местах разобрать напевную речь чрезвычайно сложно или невозможно. Поэтому в целом, слабо слыша произносимые слова, прислушиваясь, молящийся мог выхватывая отдельные слова, или даже слоги, понимать, какая молитва сейчас обращена к Богу и в каком месте литургия находится в данный момент, мог произнести самостоятельно молитву про себя. Позволим себе предположение, что находящемуся в глубоком молитвенном состоянии человеку, хорошо знающему и представляющему все символические действия литургии и значение текстов на старославянском языке, будет даже мешать хорошая слышимость произносимых слов. Человек, находясь в некоем коллективном действии, одновременно сохраняет самостоятельность, индивидуальность и интимность обращения к Богу благодаря данным свойствам звуковой среды. Примечательно, что в большинстве работ, посвященных акустике православных церквей, приводятся похожие ситуации с характеристиками разборчивости речи [3-8].

На рис. 13 можно увидеть показатели С-80, когда источник звука находится на клиросе (за колонной). В данном случае все приемные позиции, кроме седьмой, находятся вне прямой видимости источника звука. Показатели неудовлетворительны.

Рассмотрим наполненный храм (см. рис. 14). Ситуация на первой и седьмой позиции значительно улучшается и попадает в зону хорошей ясности звучания. При этом «полетность» звука сохраняется, о чем свидетельствует большое значение времени реверберации (2,2 с в заполненном храме). Таким образом, другой доминирующий феномен акустики православной церкви — «полетность» (возвышенность) звучания в наполненном храме присутствует.

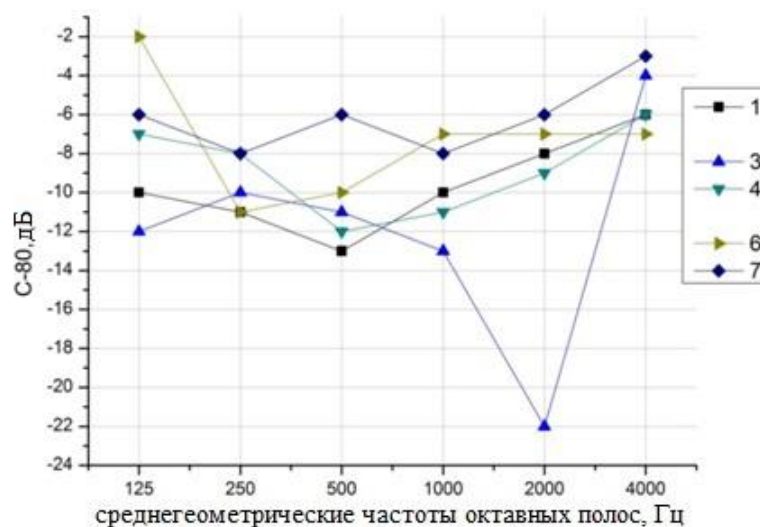


Рис. 13. Показатели C-80, дБ.
Храм пустой. Источник находится на клиросе (№ 3)

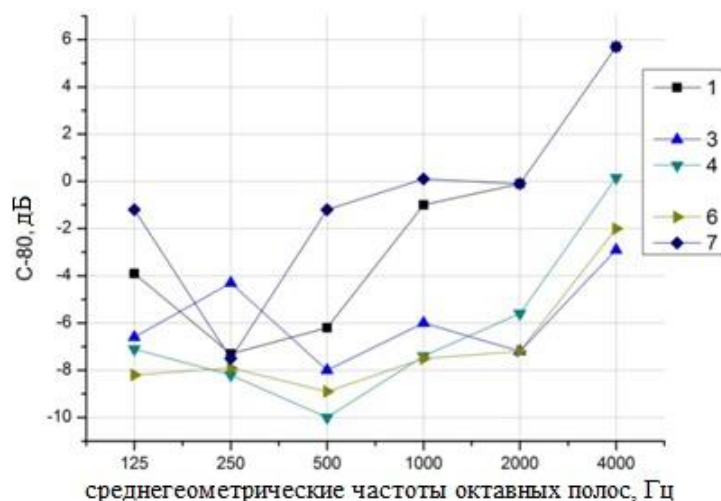


Рис. 14. Показатели C-80, дБ.
Наполненный храм. Источник находится на клиросе (№ 3)

3.4 STI — индекс разборчивости

Данный индекс нацелен на оценку разборчивости речи по более сложному алгоритму, чем при получении параметра D-50. Показатели ниже 0,5 определяют неудовлетворительную разборчивость речи. STI можно получить только с помощью излучения белого шума с достаточно большой длительностью сигнала. При измерении акустики православных храмов важно учесть направленность человеческого голоса с учетом того, что священнослужители большую часть литургии осуществляют по направлению лицом к алтарю и, соответственно, спиной к прихожанам. Для этого необходимы устройства, которые имитируют направленность человеческого голоса с

учетом акустической тени от тела и при этом излучают измерительный сигнал, но в данном исследовании показатели STI измерялись без применения такого устройства.

Поскольку в залах встречается обратно пропорциональная зависимость характеристики разборчивости речи от времени реверберации [2], авторов данной работы интересовало, насколько эта закономерность будет проявляться в данном храме.

Итак, рассмотрим полученные значения. На рис. 15 отображается ситуация с позицией источника №1. Смотри на кривую 1 видно, что в зону удовлетворительных значений попадают лишь позиции 4, 7 и 8. Последние две позиции находятся непосредственно у источника, 4-я позиция на отдалении, но в прямой зоне видимости. Примечательно, что приемная позиция № 1, расположенная ближе к источнику, чем позиция № 4, попала в неудовлетворительную зону. Остальные позиции показывают откровенно плохую разборчивость, что неудивительно, поскольку большинство из них находятся вне прямой видимости источника звука № 1 (за колоннами, и на отдалении). Напомним, что время реверберации в данном случае составляет в среднем от 3,5 с до 4 с в среднечастотных полосах (см. рис. 5).

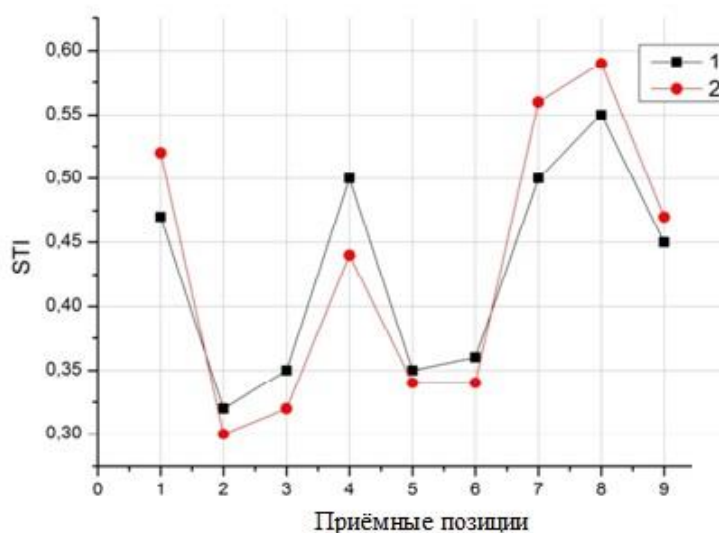


Рис. 15. Показатели STI.

Позиция источника № 1. Кривая № 1 - пустой храм; кривая № 2 - наполненный храм

Теперь рассмотрим полученные данные по кривой 2 рис. 15, когда в храме находились люди. В целом она похожа на первую кривую, однако есть отличия. Теперь приемная позиция № 1 уже попала в удовлетворительную зону разборчивости, а позиции 7 и 8 улучшили показатели и вплотную подошли к зоне с хорошей разборчивостью, начинающуюся с 0,6. На позициях 2, 3, 5, 6, которые, как отмечалось, отдалены от источника звука и находятся вне прямой зоны видимости, произошло некоторое ухудшение, но незначительное. Вновь напомним, что в данном случае время реверберации составляло порядка 2 с в среднечастотных полосах (см. рис. 5). Таким

образом, рассматривая зависимость разборчивости речи от времени реверберации в данном объемно-планировочном решении храма, отмечаем сложную нелинейную взаимосвязь этих двух характеристик звукового поля. При наполнении храма людьми, разборчивость на отдаленных местах становится незначительно хуже или практически не меняется. Ближние позиции к источнику звука уже имеют более заметное изменение в сторону улучшения. При этом стоит отметить, что отличие во времени реверберации в пустом и заполненном зале отличается гораздо более существенно — полторы-две секунды.

3.5 IDTG «временной промежуток между прямым сигналом и первыми отражениями»

В целом задержка группы первых ярко выраженных отражений относительно прямого сигнала одинакова и составляет примерно 10-12 мс (см. рис. 16). При этом их уровень невысок, поэтому ощущения «эхо» не наблюдается. Однако на приемной позиции № 6 (самая дальняя от источника) обнаруживаются значения уже порядка 100–200 мс (см. рис. 17). Здесь существует вероятность возникновения эхо.

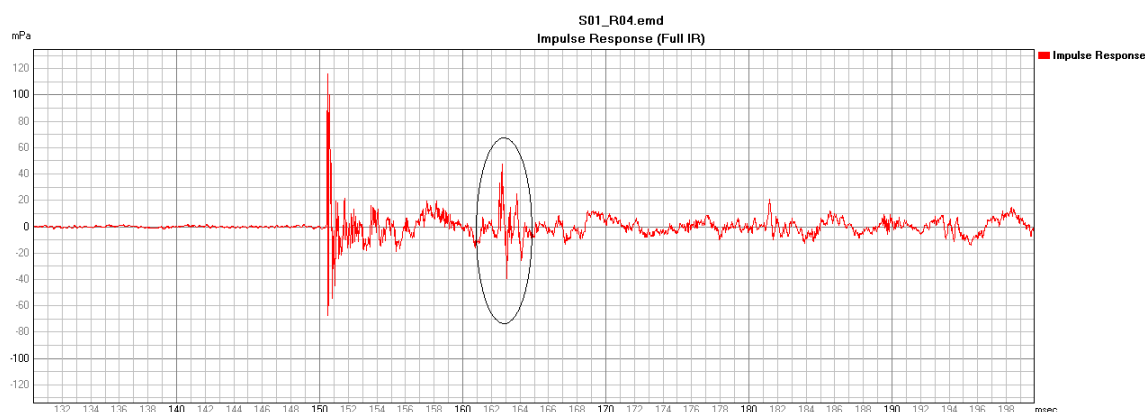


Рис. 16. Кривая энергия-время (ЕТС).
Приемная позиция 4. Источник № 1

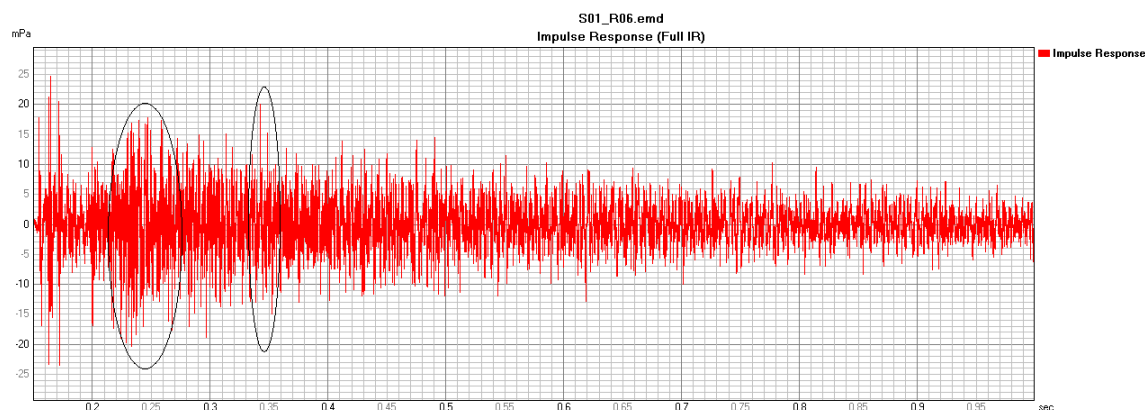


Рис. 17. Кривая энергия-время (ЕТС).
Приемная позиция 6. Источник № 1

3.6 LF «боковая доля»

Степень звуковой энергии, которая приходит с боковых направлений, важна в восприятии звучания в целом, но особенно пространства, поскольку поступает в виде сигнала в слуховые каналы человека под близкими к прямому углами (отражения от стен). В больших, широких помещениях достаточно удачным является показатель 0,2–0,3. В данном пространстве — пространстве храма, которое довольно узкое, но высокое, боковые стены находятся близко друг к другу, теснят пространство массивные колонны. Поэтому полученный показатель боковой доли здесь чрезвычайно высок — порядка 0,4. Является ли это большим вкладом в пространственное впечатление наряду с высоким временем реверберации, однозначно ответить нельзя. Однако из полученных данных становится ясно, что доля энергии звука, приходящей с боковых направлений в храме с такими пропорциями, существенно больше, чем в концертном или театральном зале.

3.7 G «сила»

В целом по позициям значения параметра составляют от 5 до 6 дБ. Вблизи источника — 8–12 дБ, на первой приемной позиции — 2 дБ. Таким образом, показатели находятся между трубками оптимумов симфонической музыки (1,5–5,5 дБ) и камерной музыки (9–13 дБ). В литературе не встречаются рекомендации с оптимальными значениями для храмов по данному акустическому параметру. Мы в свою очередь можем отметить, что сила звука, субъективно воспринимаемая нами в данном храме, когда поет хор, может быть оценена как достаточно большая.

3.8 ST «поддержка»

Этот параметр оценивает степень комфортности исполнения музыки самими музыкантами. В данном случае это певчие хора. Соответственно, измерения были проведены на клиросе. Показатель в частотной полосе 500–4000 Гц равен –8 дБ как для ST-1, так и для ST-2. Поскольку в «храмовой» акустике существует множество особенностей, думается, что оптимальные показатели должны быть экспериментально найдены для храмов отдельно. На сегодняшний же момент известны оптимумы ST только для симфонической и камерной музыки. Однако в источнике [9] упоминается показатель –7,6 дБ в православном храме, имеющим хорошую репутацию у исполнителей.

ВЫВОДЫ

Софийско-Успенский кафедральный собор в г. Тобольске характеризует выдающееся среди некоторых других церквей свойство — в заполненном храме сохраняется высокая степень «полетности» звучания и при этом характеристики ясности музыкальной фактуры и разборчивости речи, в отличие от ситуации с пустым храмом, несколько улучшаются. Планировочное решение собора отличает его от некоторых других: малая площадь пола в сравнении с высотой и, как следствие, весьма

высокий удельный объем воздуха на одного человека — более 100 куб. м. Поэтому даже в наполненном людьми храме (в количестве 30 человек) время реверберации сохраняется на высоком уровне — 2,2 с, что проявляется в ощущении «полётности и возвышенности» звучания — одним из главных феноменов акустики православных храмов. При этом параметры ясности и разборчивости улучшаются на приемных позициях вблизи источника звука. На дальних позициях эти характеристики остаются неудовлетворительными. По мнению авторов, данное обстоятельство можно отнести к другому феномену акустики православных храмов — разборчивость слов не оптимизировалась сознательно, но её минимальное присутствие в «теневых» зонах позволяет опытному и знающему прихожанину ориентироваться в литургии по узнаванию отдельных знаковых фраз и слов, пропетых с определённой интонацией. Такое свойство акустики не мешает внутренней молитве человека, но и не дает ему потеряться в ходе службы. Софийско-Успенский собор в этом смысле приемлем за счет небольшой площади «теневых» зон, как, впрочем, и благоприятных тоже. Нахождение источника звука в алтаре как при закрытых царских вратах, так и при открытых не дает хотя бы приемлемой разборчивости. Впрочем, в алтаре произносятся тайные молитвы. Также следует учесть, что возгласы из алтаря, предназначенные для прихожан произносятся в виде напевной интонации со знакомыми короткими музыкальными мотивами, соотносящимися и по длительности, и по эмоциональному характеру со словами. Поэтому оценка по известным параметрам ясности и разборчивости звучания здесь, по всей видимости, неактуальна. В данном случае имеет значение механизм фиксации слухом человека символического восклицания в виде знакомого музыкального мотива. Порог восприятия такой фиксации в данной акустической среде достаточно низкий. Нам видится в этом смысле серьезное поле для дальнейших исследований. Будущие работы по храмовой акустике должны быть посвящены учёту направленности речи произносящего молитву священника в сторону алтаря и спиной к прихожанам, а также нахождению оптимальных акустических характеристик в зависимости от конкретного количества присутствующих на службе прихожан.

Выражаем глубокую признательность за помощь в проведении исследований отцу Льву, Дмитрию Уланову, Цицулину Ярославу, Тянь Олегу, Пальянову Владиславу, Руденко Анастасии, Вакиловой Диане, Дудеву Георгу, Фоминых Ивану и мужскому хору Колледжа русской культуры им. А. С. Знаменского.

ЛИТЕРАТУРА

1. Beranek L. Concert Halls and Opera Houses. Springer-Verlag. New York. 2004.
2. Marshall Long. Architectural Acoustics. Elsevier, 2006.
3. Ланэ М. Ю., Сухов В. Н. Акустическое обследование Храма Христа Спасителя в Москве и проблема разборчивости речи в крупных православных соборах. Акустический журнал. 2001 г., т. 47.
4. Lannie M., Soukhov V. Acoustics of St. Bazils Cathedral at the Red Square (Moscow). Building Acoustics, 1999, v. 6, 3-7.

5. Lannie M. Acoustics of the Troitskii Cathedral in the Ipatiev Monastery. Acoustical Physics, Vol. 40, №1. 1994.
6. Lannie M., Chesnokov A. N., Shchirzhetskii Kh. A. Acoustics of the Cathedral of the Moscow Kremlin. Acoustical Physics, Vol. 44, №4. 1998.
7. Chesnokov A. N., Lannie M. Acoustics of the church of the Intercession at Fili (Moscow). AES. Preprint 4247. 1996.
8. І. В. Вовк, Грінченко В. Т., Макаренков А. П., Осипчук Л. М., Трохименко М. П. Акустика Храмів Київської Русі. Акустичний вісник. Том 1, №1. 1998.
9. Jerzy Wiciak and Pawel Malecki. Acoustic parameters of chosen Orthodox churches overview and psychoacoustic estimation of their use for choral music. BNAM 2010.