

*Филиппович А.Ю.,
к.т.н., доцент МГТУ им. Н.Э.Баумана
Голубева И.В.,
аспирантка МГТУ им. Н.Э.Баумана*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНТАКСИСА СЕМИОГРАФИЧЕСКИХ ПЕСНОПЕНИЙ

Музыкальные инфо-когнитивные технологии и знаменные песнопения¹

Одним из перспективных направлений развития инфо-когнитивных технологий является исследование механизмов работы невербального сознания людей. Особое место в изучении этих вопросов занимают музыка и связанные с ней когнитивные процессы, которые часто находятся в тесной связи с речевой деятельностью человека.

Музыка также как и язык является предметом коммуникации и не существует вне общения людей [1], поэтому она всегда выступает результатом некоторого человеческого посредничества или исполнения, хотя источниками звуков могут служить различные природные и техногенные явления.

Для объяснения близости двух когнитивных систем выдвинута гипотеза о том, что музыка и язык развивались из общего предка – «музолингвальной системы» («musilanguage system»), которая и определила их общие признаки [2]. По мере развития две системы приобрели самостоятельные и уникальные черты, однако по-прежнему тесно взаимодействуют между собой.

Исследователи в области нейролингвистики полагают, что письменная речь является отражением мыслительных процессов человека и раскрывает законы языкового мышления. Это дает основания предположить, что и музыкальные записи хранят в себе ответы на вопросы об устройстве невербального сознания, его эмоциональной, культурной и других составляющих.

Создание графических средств, позволяющих зафиксировать музыкальные произведения на бумаге, явилось революционным событием в истории музыки и тесно связано с развитием письма в целом - первые системы языкового и музыкального письма появились в одних культурах и принадлежат одному типу письма. [13]

¹ Статья подготовлена при поддержке гранта РГНФ №110412025в «Автоматизированная система научных исследований в области компьютерной семиографии (АНСИ КС)».

Записи музыки, как и записи речевых сообщений, начинались с рисунков, которые постепенно эволюционировали в направлении к пиктографии и иероглифике. Об этому свидетельствуют первые рисуночные и иероглифические жреческие записи музыки, которые были найдены в Древнем Египте [13]. Несколько веков спустя, в VI-VII вв. в европейской (греческой) церковной музыке появляется невменная нотация, которая, трансформируясь, развивается в Византии и вместе с христианством приходит в древнерусские песнопения.

Музыкальные произведения Руси XI-XVII веков записывались с помощью специальной музыкальной системы (нотации), которую принято называть знаменной или семиографической. Она содержит нескольких сотен знамен (крюков), каждому из которых соответствует определенная последовательность звуков различной длительности и высоты.



Рисунок 1. Фрагмент музыкальной рукописи в знаменной нотации

Во время Петровских реформ знаменная нотация была заменена на «итальянскую» - более простую и современную ното-линейную систему, которую мы используем и по сей день. К сожалению, во время преобразований был утрачен «ключ» к расшифровке мелодий, что не позволяет однозначно перевести многие старинные песнопения в современное представление.

Вместе с тем музыкальные записи, начиная с первой половины XVII века, имеют дополнительные обозначения относительной высоты звуков и длительности, которые

являются «подсказками» исполнителю. Это позволяет анализировать их, и переносить полученные знания на песнопения более ранних периодов. Однако для полной расшифровки необходимо выявлять в знаменной нотации внутренние законы, в силу которых мелодии записывались с помощью одних знамен, а не других.

Для решения этой задачи в рамках проекта «Автоматизированная система научных исследований в области компьютерной семиографии (АНСИ КС)» выдвинута гипотеза о наличии в знаменных песнопениях определенной семиотической системы, близкой по своей структуре и механизмам к естественному языку. Это позволяет применять лингвистические методы для обработки и анализа песнопений, выявления их музыкального «лексикона», синтаксиса, семантики и прагматики.

В случае всестороннего подтверждения указанной гипотезы будут достигнуты не только ценные результаты по сохранению богатого наследия национальной певческой культуры, но и открыты новые фундаментальные механизмы музыкальных инфо-когнитивных технологий.

Музыкальная семиотика

Знаменные песнопения являются одной из множества знаковых систем, которыми люди пользуются в целях коммуникации, передавая музыкальные сообщения о своих мыслях, чувствах, переживаниях. Знаки в музыке и образуемые ими знаковые системы изучает музыкальная семиотика, в рамках которой в настоящее время сформулировано множество различных теорий, моделей и подходов: Теория восприятия и понимания мелодий - модель Implication/Realization (I/R) [3], Парадигматический анализ [4,5], Порождающая Теория Тональной Музыки (GTTM) [6] и др.



Рисунок 2. Знамя «Параклит»

Разработанные подходы не могут быть напрямую применены для анализа и расшифровки знаменных песнопений, т.к. они опираются на современную ното-линейную систему и не учитывают специфику семиографического представления. Однако в перспективе, после получения вариантов расшифровки, можно осуществить оценку указанных теорий на предмет их применимости для разрешения многозначности трактовок.

Для использования лингвистических методов при анализе песнопений были проведены «лингво-музыкальные» аналогии (таблица 1) и выделены соответствующие семиотические конструкции в музыкальных произведениях. Основными элементами семиографических песнопений являются знамена, которые чем-то похожи на иероглифы – они имеют уникальные графемы, сформированные из базовых и дополнительных элементов («знамем»), соответствуют мелодиям и напевам (последовательности нот определенной высоты и длительности). Знамена в свою очередь могут комбинироваться в более сложные структуры – попевки, фиты, лица и другие музыкальные фигуры.

Таблица 1 - Возможные аналогии между музыкальными и лингвистическими конструкциями

Музыка	Язык	Описание
Знамя (крюк)	Слово, лексема	Базовая единица семиографического языка, используемая для обозначения последовательности нот определенной высоты, длительности и характера исполнения.
Знамема	Морфема	Мельчайшая значимая структура знамени, к которой относятся базовые элементы, пометы, признаки.
Базовый элемент	Корень	Используется как основной элемент для построения других знамен (например, «крюк», «стрела»). Как правило, образуют семейства знамен.
Дополнительный элемент	Аффикс	Дополнительные элементы, которые графически размещаются в различных частях знамени, меняя или уточняя его интерпретацию (например, «крыж», «подчашие»).
Пометы, Признаки	Диакритические знаки	знаки, применяемые для изменения или уточнения значения знамени, а также указания характера исполнения.
Базовое знамя	Лемма	Знамя, которое не содержит признаков и помет.
Производное знамя	Словоформа	Знамя, полученное путем добавления к базовому знамени признака или пометы.
Знаменный алфавит	Лексикон	Список всех существующих знамен, используемых для записи мелодий.
Последовательность знамен	Словосочетания, предложения	Фрагменты песнопения, содержащие несколько знамен, которые могут выделяться на основе связанного текста или музыкальных конструкций.
Попевки	Устойчивые	Типовые мелодические обороты или их

	словосочетания	шаблоны, состоящие из нескольких знамен.
Фиты, Лица	Фразеологизмы, идиомы	Фрагменты песнопений, имеющие особые правила исполнения знамен и не соответствующие их «прямой» интерпретации.

Сходство между текстами и музыкальной частью песнопений распространяется не только на базовые конструкции, но и на отношениями между знаками. Из-за высокой сложности музыкальной нотации можно предположить, что в знаменной системе существуют определенные правила и ограничения, формируемые синтаксическими, семантическими и прагматическими отношениями между знаками, мелодиями и целями песнопений.

Об этом свидетельствует наличие в знаменных песнопениях типовых мелодических оборотов (попевок, кокиз) и явлений «тайнозамкненности» - графического приема зашифровки напева «посредством такого условного сочетания знамен, которое не образует этого напева в случае исполнения согласно их общему певческому значению» [7].

Составление полного и достоверного списка попевок в настоящее время является нерешенной задачей, т.к. процедура их выделения трудоемка и недостаточно формализована. Использование статистических методов компьютерной лингвистики может внести некоторую определенность в этом вопросе за счет выявления устойчивых знаменных сочетаний, а также определить размерность и вариативность существующих попевок.

Разработка инструментария и проведение исследований

Для решения задач автоматизированной обработки выбранных рукописей в течение нескольких лет была проделана работа, которую включала следующие укрупненные этапы:

- перевод песнопений в электронный вид,
- проведение базовых статистических исследований,
- разработка информационных и математических моделей,
- проверка, коррекция и применение моделей.

На первом этапе были разработаны и оптимизированы специальные компьютерные шрифты (гарнитура Andrew Semio), осуществлен ручной ввод и коррекция семиографических песнопений [8]. В качестве исходных данных выбран "Круг церковного древнего знаменного пения 1884-1885 гг. в шести частях (под редакцией Д.В. Разумовского)" — фундаментальное собрание певческих книг русской церкви, полностью

нотированных знаменами и содержащих свыше 1500 песнопений. На рисунке 3 представлен фрагмент набранного в Microsoft Word песнопения, который содержит строки текста, разбитые по слогам, и соответствующие им знамена.

п	а	е	п	е	е	е	
Подз	тко	е	дер	жак	но	е	
а	е	п	а	п	а	е	
пред	ста	—	тель	тко.	при	кѣ	
п	п	п	п	п	а	а	а
га	ю	щї	н	при	—	но,	бо

Рисунок 3. Пример набранного текста с использованием компьютерных шрифтов

На втором этапе проекта были проведены статистические исследования, идею которых в области изучения древнерусской музыки впервые предложил М.В. Бражников [7]. Его метод заключается в количественном подсчете знамен и построении наглядных графиков для последующего анализа. В качестве примера реализации такой технологии можно привести работу Б.Г. Смолякова [11], в которой ручным способом была проанализирована первая часть двоезнаменника «Ирмологий» (17 век), построены сравнительные графики для различных гласов.

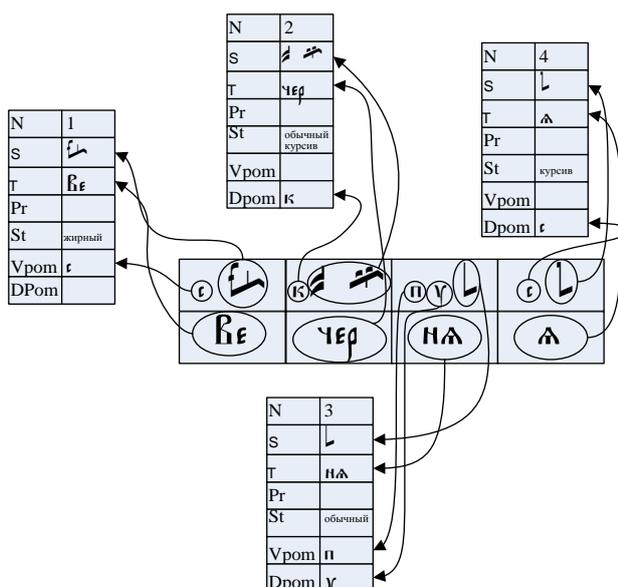


Рисунок 4. Схема разбора семиграфических песнопений

Для автоматизированной обработки песнопений сначала использовался

лингвистический редактор Andrew Tools, а затем был разработан специальный программный комплекс SemioStatistik [9-10]. Он осуществляет считывание исходных данных в различных форматах (Word, Excel), разбор таблиц и ячеек на составляющие части, которые записываются в соответствующие информационные XML-структуры (рисунок 4).

The screenshot shows the SemioStatistik application window. At the top, there is a menu bar with options: Проект, Текстовый файл, Excel, Word, Словник, Буквенник, Конкорданс, Алфавит. Below the menu is a 'Параметры:' section with dropdown menus for 'Тип исходного файла:' (set to Word) and 'Содержание исходного файла:' (set to Знамена+текст). There are also checkboxes for 'Добавить результаты к уже существующим' (unchecked) and 'Учитывать пометы' (checked). Below this is a row of tabs: Конкорданс, Частотный конкорданс, Знамя+Слог, Знамя+Слог Част, Пометы, Table, Text, Словник, Частотный словник, Буквенник, Частотный буквенник. A 'Сортировка' dropdown is set to 'По частоте'. The main area contains a table with the following data:

	Words	Частота	Стиль	Высотная по	Помета дли
6	с	11	text		
7	п	10	помета	п	
8	м	10	помета	м	
9	р	9	text		
10	о	9	обычный		
11	в	9	text		
12	т	7	помета	с	т
13	-	6	text		

Рисунок 5. Фрагмент частотного буквенника с учетом помет

После предварительной обработки данных SemioStatistik позволяет создавать различные лексикографические структуры - частотные и простые конкордансы, словники, знаменники, буквенники и др (рисунок 5), а также экспортировать их в различных форматах (рисунок 6) .

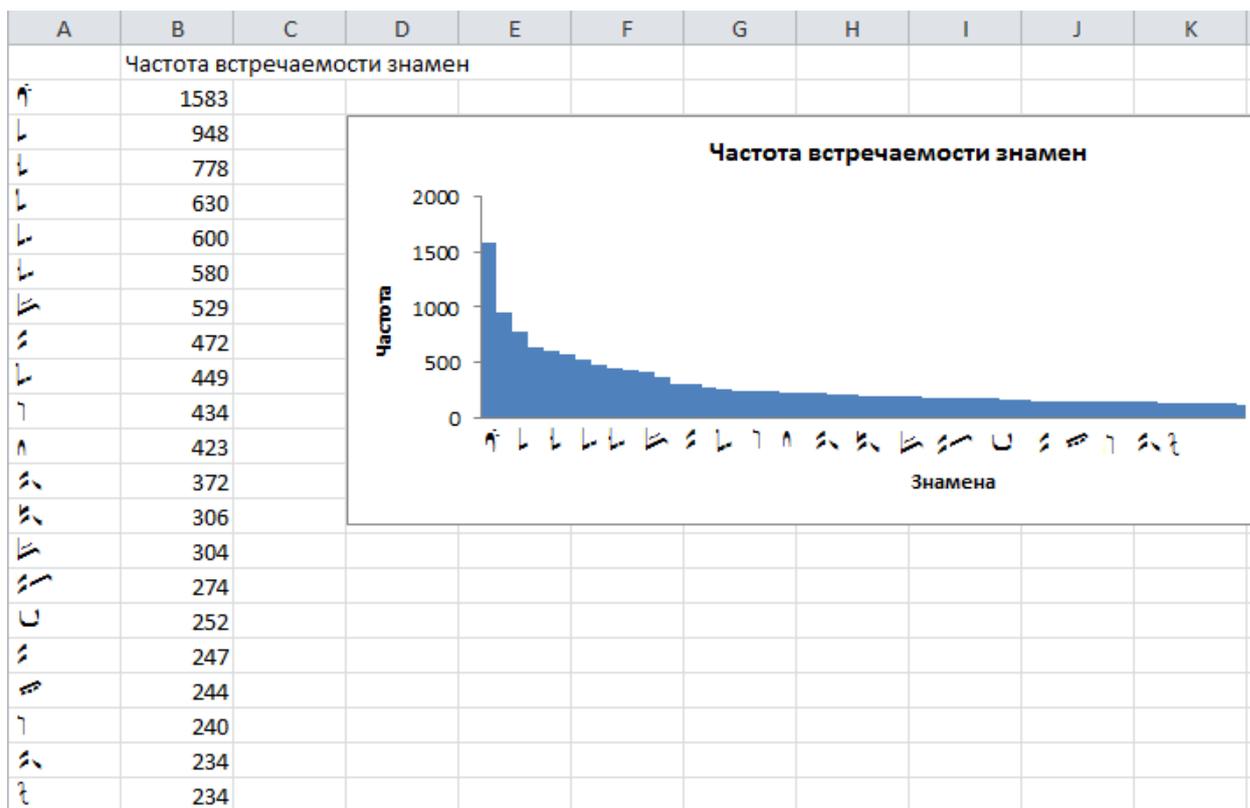


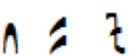
Рисунок 6. Частота встречаемости знамен

Частотный анализ знамен показал, что их можно разделить на 4 группы по числу повторений (таблица 2). Сопоставление знамен с их семантикой, представленной в литературе [7], позволило выделить из выбранных знамен служебные и основные (таблица 3).

Таблица 2 - Распределение знамен на 4 частотные группы

№ группы	I	II	III	IV
Число повторений каждого знамени	1000-3000	500-1000	150-500	1-150
Количество знамен в группе	6	7	30	323
Базовые знамена группы	𐀀 𐀁 𐀂	𐀃 𐀄 𐀅 𐀆 𐀇	𐀈 𐀉 𐀊 𐀋 𐀌 𐀍 𐀎 𐀏 𐀐 𐀑 𐀒 𐀓 𐀔 𐀕 𐀖 𐀗 𐀘 𐀙 𐀚 𐀛 𐀜 𐀝 𐀞 𐀟 𐀠 𐀡 𐀢 𐀣 𐀤 𐀥 𐀦 𐀧 𐀨 𐀩 𐀪 𐀫 𐀬 𐀭 𐀮 𐀯 𐀰 𐀱 𐀲 𐀳 𐀴 𐀵 𐀶 𐀷 𐀸 𐀹 𐀺 𐀻 𐀼 𐀽 𐀾 𐀿 𐁀 𐁁 𐁂 𐁃 𐁄 𐁅 𐁆 𐁇 𐁈 𐁉 𐁊 𐁋 𐁌 𐁍 𐁎 𐁏 𐁐 𐁑 𐁒 𐁓 𐁔 𐁕 𐁖 𐁗 𐁘 𐁙 𐁚 𐁛 𐁜 𐁝 𐁞 𐁟 𐁠 𐁡 𐁢 𐁣 𐁤 𐁥 𐁦 𐁧 𐁨 𐁩 𐁪 𐁫 𐁬 𐁭 𐁮 𐁯 𐁰 𐁱 𐁲 𐁳 𐁴 𐁵 𐁶 𐁷 𐁸 𐁹 𐁺 𐁻 𐁼 𐁽 𐁾 𐁿 𐂀 𐂁 𐂂 𐂃 𐂄 𐂅 𐂆 𐂇 𐂈 𐂉 𐂊 𐂋 𐂌 𐂍 𐂎 𐂏 𐂐 𐂑 𐂒 𐂓 𐂔 𐂕 𐂖 𐂗 𐂘 𐂙 𐂚 𐂛 𐂜 𐂝 𐂞 𐂟 𐂠 𐂡 𐂢 𐂣 𐂤 𐂥 𐂦 𐂧 𐂨 𐂩 𐂪 𐂫 𐂬 𐂭 𐂮 𐂯 𐂰 𐂱 𐂲 𐂳 𐂴 𐂵 𐂶 𐂷 𐂸 𐂹 𐂺 𐂻 𐂼 𐂽 𐂾 𐂿 𐃀 𐃁 𐃂 𐃃 𐃄 𐃅 𐃆 𐃇 𐃈 𐃉 𐃊 𐃋 𐃌 𐃍 𐃎 𐃏 𐃐 𐃑 𐃒 𐃓 𐃔 𐃕 𐃖 𐃗 𐃘 𐃙 𐃚 𐃛 𐃜 𐃝 𐃞 𐃟 𐃠 𐃡 𐃢 𐃣 𐃤 𐃥 𐃦 𐃧 𐃨 𐃩 𐃪 𐃫 𐃬 𐃭 𐃮 𐃯 𐃰 𐃱 𐃲 𐃳 𐃴 𐃵 𐃶 𐃷 𐃸 𐃹 𐃺 𐃻 𐃼 𐃽 𐃾 𐃿 𐄀 𐄁 𐄂 𐄃 𐄄 𐄅 𐄆 𐄇 𐄈 𐄉 𐄊 𐄋 𐄌 𐄍 𐄎 𐄏 𐄐 𐄑 𐄒 𐄓 𐄔 𐄕 𐄖 𐄗 𐄘 𐄙 𐄚 𐄛 𐄜 𐄝 𐄞 𐄟 𐄠 𐄡 𐄢 𐄣 𐄤 𐄥 𐄦 𐄧 𐄨 𐄩 𐄪 𐄫 𐄬 𐄭 𐄮 𐄯 𐄰 𐄱 𐄲 𐄳 𐄴 𐄵 𐄶 𐄷 𐄸 𐄹 𐄺 𐄻 𐄼 𐄽 𐄾 𐄿 𐅀 𐅁 𐅂 𐅃 𐅄 𐅅 𐅆 𐅇 𐅈 𐅉 𐅊 𐅋 𐅌 𐅍 𐅎 𐅏 𐅐 𐅑 𐅒 𐅓 𐅔 𐅕 𐅖 𐅗 𐅘 𐅙 𐅚 𐅛 𐅜 𐅝 𐅞 𐅟 𐅠 𐅡 𐅢 𐅣 𐅤 𐅥 𐅦 𐅧 𐅨 𐅩 𐅪 𐅫 𐅬 𐅭 𐅮 𐅯 𐅰 𐅱 𐅲 𐅳 𐅴 𐅵 𐅶 𐅷 𐅸 𐅹 𐅺 𐅻 𐅼 𐅽 𐅾 𐅿 𐆀 𐆁 𐆂 𐆃 𐆄 𐆅 𐆆 𐆇 𐆈 𐆉 𐆊 𐆋 𐆌 𐆍 𐆎 𐆏 𐆐 𐆑 𐆒 𐆓 𐆔 𐆕 𐆖 𐆗 𐆘 𐆙 𐆚 𐆛 𐆜 𐆝 𐆞 𐆟 𐆠 𐆡 𐆢 𐆣 𐆤 𐆥 𐆦 𐆧 𐆨 𐆩 𐆪 𐆫 𐆬 𐆭 𐆮 𐆯 𐆰 𐆱 𐆲 𐆳 𐆴 𐆵 𐆶 𐆷 𐆸 𐆹 𐆺 𐆻 𐆼 𐆽 𐆾 𐆿 𐇀 𐇁 𐇂 𐇃 𐇄 𐇅 𐇆 𐇇 𐇈 𐇉 𐇊 𐇋 𐇌 𐇍 𐇎 𐇏 𐇐 𐇑 𐇒 𐇓 𐇔 𐇕 𐇖 𐇗 𐇘 𐇙 𐇚 𐇛 𐇜 𐇝 𐇞 𐇟 𐇠 𐇡 𐇢 𐇣 𐇤 𐇥 𐇦 𐇧 𐇨 𐇩 𐇪 𐇫 𐇬 𐇭 𐇮 𐇯 𐇰 𐇱 𐇲 𐇳 𐇴 𐇵 𐇶 𐇷 𐇸 𐇹 𐇺 𐇻 𐇼 𐇽 𐇾 𐇿 𐈀 𐈁 𐈂 𐈃 𐈄 𐈅 𐈆 𐈇 𐈈 𐈉 𐈊 𐈋 𐈌 𐈍 𐈎 𐈏 𐈐 𐈑 𐈒 𐈓 𐈔 𐈕 𐈖 𐈗 𐈘 𐈙 𐈚 𐈛 𐈜 𐈝 𐈞 𐈟 𐈠 𐈡 𐈢 𐈣 𐈤 𐈥 𐈦 𐈧 𐈨 𐈩 𐈪 𐈫 𐈬 𐈭 𐈮 𐈯 𐈰 𐈱 𐈲 𐈳 𐈴 𐈵 𐈶 𐈷 𐈸 𐈹 𐈺 𐈻 𐈼 𐈽 𐈾 𐈿 𐉀 𐉁 𐉂 𐉃 𐉄 𐉅 𐉆 𐉇 𐉈 𐉉 𐉊 𐉋 𐉌 𐉍 𐉎 𐉏 𐉐 𐉑 𐉒 𐉓 𐉔 𐉕 𐉖 𐉗 𐉘 𐉙 𐉚 𐉛 𐉜 𐉝 𐉞 𐉟 𐉠 𐉡 𐉢 𐉣 𐉤 𐉥 𐉦 𐉧 𐉨 𐉩 𐉪 𐉫 𐉬 𐉭 𐉮 𐉯 𐉰 𐉱 𐉲 𐉳 𐉴 𐉵 𐉶 𐉷 𐉸 𐉹 𐉺 𐉻 𐉼 𐉽 𐉾 𐉿 𐊀 𐊁 𐊂 𐊃 𐊄 𐊅 𐊆 𐊇 𐊈 𐊉 𐊊 𐊋 𐊌 𐊍 𐊎 𐊏 𐊐 𐊑 𐊒 𐊓 𐊔 𐊕 𐊖 𐊗 𐊘 𐊙 𐊚 𐊛 𐊜 𐊝 𐊞 𐊟 𐊠 𐊡 𐊢 𐊣 𐊤 𐊥 𐊦 𐊧 𐊨 𐊩 𐊪 𐊫 𐊬 𐊭 𐊮 𐊯 𐊰 𐊱 𐊲 𐊳 𐊴 𐊵 𐊶 𐊷 𐊸 𐊹 𐊺 𐊻 𐊼 𐊽 𐊾 𐊿 𐋀 𐋁 𐋂 𐋃 𐋄 𐋅 𐋆 𐋇 𐋈 𐋉 𐋊 𐋋 𐋌 𐋍 𐋎 𐋏 𐋐 𐋑 𐋒 𐋓 𐋔 𐋕 𐋖 𐋗 𐋘 𐋙 𐋚 𐋛 𐋜 𐋝 𐋞 𐋟 𐋠 𐋡 𐋢 𐋣 𐋤 𐋥 𐋦 𐋧 𐋨 𐋩 𐋪 𐋫 𐋬 𐋭 𐋮 𐋯 𐋰 𐋱 𐋲 𐋳 𐋴 𐋵 𐋶 𐋷 𐋸 𐋹 𐋺 𐋻 𐋼 𐋽 𐋾 𐋿 𐌀 𐌁 𐌂 𐌃 𐌄 𐌅 𐌆 𐌇 𐌈 𐌉 𐌊 𐌋 𐌌 𐌍 𐌎 𐌏 𐌐 𐌑 𐌒 𐌓 𐌔 𐌕 𐌖 𐌗 𐌘 𐌙 𐌚 𐌛 𐌜 𐌝 𐌞 𐌟 𐌠 𐌡 𐌢 𐌣 𐌤 𐌥 𐌦 𐌧 𐌨 𐌩 𐌪 𐌫 𐌬 𐌭 𐌮 𐌯 𐌰 𐌱 𐌲 𐌳 𐌴 𐌵 𐌶 𐌷 𐌸 𐌹 𐌺 𐌻 𐌼 𐌽 𐌾 𐌿 𐍀 𐍁 𐍂 𐍃 𐍄 𐍅 𐍆 𐍇 𐍈 𐍉 𐍊 𐍋 𐍌 𐍍 𐍎 𐍏 𐍐 𐍑 𐍒 𐍓 𐍔 𐍕 𐍖 𐍗 𐍘 𐍙 𐍚 𐍛 𐍜 𐍝 𐍞 𐍟 𐍠 𐍡 𐍢 𐍣 𐍤 𐍥 𐍦 𐍧 𐍨 𐍩 𐍪 𐍫 𐍬 𐍭 𐍮 𐍯 𐍰 𐍱 𐍲 𐍳 𐍴 𐍵 𐍶 𐍷 𐍸 𐍹 𐍺 𐍻 𐍼 𐍽 𐍾 𐍿 𐎀 𐎁 𐎂 𐎃 𐎄 𐎅 𐎆 𐎇 𐎈 𐎉 𐎊 𐎋 𐎌 𐎍 𐎎 𐎏 𐎐 𐎑 𐎒 𐎓 𐎔 𐎕 𐎖 𐎗 𐎘 𐎙 𐎚 𐎛 𐎜 𐎝 𐎞 𐎟 𐎠 𐎡 𐎢 𐎣 𐎤 𐎥 𐎦 𐎧 𐎨 𐎩 𐎪 𐎫 𐎬 𐎭 𐎮 𐎯 𐎰 𐎱 𐎲 𐎳 𐎴 𐎵 𐎶 𐎷 𐎸 𐎹 𐎺 𐎻 𐎼 𐎽 𐎾 𐎿 𐏀 𐏁 𐏂 𐏃 𐏄 𐏅 𐏆 𐏇 𐏈 𐏉 𐏊 𐏋 𐏌 𐏍 𐏎 𐏏 𐏐 𐏑 𐏒 𐏓 𐏔 𐏕 𐏖 𐏗 𐏘 𐏙 𐏚 𐏛 𐏜 𐏝 𐏞 𐏟 𐏠 𐏡 𐏢 𐏣 𐏤 𐏥 𐏦 𐏧 𐏨 𐏩 𐏪 𐏫 𐏬 𐏭 𐏮 𐏯 𐏰 𐏱 𐏲 𐏳 𐏴 𐏵 𐏶 𐏷 𐏸 𐏹 𐏺 𐏻 𐏼 𐏽 𐏾 𐏿 𐐀 𐐁 𐐂 𐐃 𐐄 𐐅 𐐆 𐐇 𐐈 𐐉 𐐊 𐐋 𐐌 𐐍 𐐎 𐐏 𐐐 𐐑 𐐒 𐐓 𐐔 𐐕 𐐖 𐐗 𐐘 𐐙 𐐚 𐐛 𐐜 𐐝 𐐞 𐐟 𐐠 𐐡 𐐢 𐐣 𐐤 𐐥 𐐦 𐐧 𐐨 𐐩 𐐪 𐐫 𐐬 𐐭 𐐮 𐐯 𐐰 𐐱 𐐲 𐐳 𐐴 𐐵 𐐶 𐐷 𐐸 𐐹 𐐺 𐐻 𐐼 𐐽 𐐾 𐐿 𐑀 𐑁 𐑂 𐑃 𐑄 𐑅 𐑆 𐑇 𐑈 𐑉 𐑊 𐑋 𐑌 𐑍 𐑎 𐑏 𐑐 𐑑 𐑒 𐑓 𐑔 𐑕 𐑖 𐑗 𐑘 𐑙 𐑚 𐑛 𐑜 𐑝 𐑞 𐑟 𐑠 𐑡 𐑢 𐑣 𐑤 𐑥 𐑦 𐑧 𐑨 𐑩 𐑪 𐑫 𐑬 𐑭 𐑮 𐑯 𐑰 𐑱 𐑲 𐑳 𐑴 𐑵 𐑶 𐑷 𐑸 𐑹 𐑺 𐑻 𐑼 𐑽 𐑾 𐑿 𐒀 𐒁 𐒂 𐒃 𐒄 𐒅 𐒆 𐒇 𐒈 𐒉 𐒊 𐒋 𐒌 𐒍 𐒎 𐒏 𐒐 𐒑 𐒒 𐒓 𐒔 𐒕 𐒖 𐒗 𐒘 𐒙 𐒚 𐒛 𐒜 𐒝 𐒞 𐒟 𐒠 𐒡 𐒢 𐒣 𐒤 𐒥 𐒦 𐒧 𐒨 𐒩 𐒪 𐒫 𐒬 𐒭 𐒮 𐒯 𐒰 𐒱 𐒲 𐒳 𐒴 𐒵 𐒶 𐒷 𐒸 𐒹 𐒺 𐒻 𐒼 𐒽 𐒾 𐒿 𐓀 𐓁 𐓂 𐓃 𐓄 𐓅 𐓆 𐓇 𐓈 𐓉 𐓊 𐓋 𐓌 𐓍 𐓎 𐓏 𐓐 𐓑 𐓒 𐓓 𐓔 𐓕 𐓖 𐓗 𐓘 𐓙 𐓚 𐓛 𐓜 𐓝 𐓞 𐓟 𐓠 𐓡 𐓢 𐓣 𐓤 𐓥 𐓦 𐓧 𐓨 𐓩 𐓪 𐓫 𐓬 𐓭 𐓮 𐓯 𐓰 𐓱 𐓲 𐓳 𐓴 𐓵 𐓶 𐓷 𐓸 𐓹 𐓺 𐓻 𐓼 𐓽 𐓾 𐓿 𐔀 𐔁 𐔂 𐔃 𐔄 𐔅 𐔆 𐔇 𐔈 𐔉 𐔊 𐔋 𐔌 𐔍 𐔎 𐔏 𐔐 𐔑 𐔒 𐔓 𐔔 𐔕 𐔖 𐔗 𐔘 𐔙 𐔚 𐔛 𐔜 𐔝 𐔞 𐔟 𐔠 𐔡 𐔢 𐔣 𐔤 𐔥 𐔦 𐔧 𐔨 𐔩 𐔪 𐔫 𐔬 𐔭 𐔮 𐔯 𐔰 𐔱 𐔲 𐔳 𐔴 𐔵 𐔶 𐔷 𐔸 𐔹 𐔺 𐔻 𐔼 𐔽 𐔾 𐔿 𐕀 𐕁 𐕂 𐕃 𐕄 𐕅 𐕆 𐕇 𐕈 𐕉 𐕊 𐕋 𐕌 𐕍 𐕎 𐕏 𐕐 𐕑 𐕒 𐕓 𐕔 𐕕 𐕖 𐕗 𐕘 𐕙 𐕚 𐕛 𐕜 𐕝 𐕞 𐕟 𐕠 𐕡 𐕢 𐕣 𐕤 𐕥 𐕦 𐕧 𐕨 𐕩 𐕪 𐕫 𐕬 𐕭 𐕮 𐕯 𐕰 𐕱 𐕲 𐕳 𐕴 𐕵 𐕶 𐕷 𐕸 𐕹 𐕺 𐕻 𐕼 𐕽 𐕾 𐕿 𐖀 𐖁 𐖂 𐖃 𐖄 𐖅 𐖆 𐖇 𐖈 𐖉 𐖊 𐖋 𐖌 𐖍 𐖎 𐖏 𐖐 𐖑 𐖒 𐖓 𐖔 𐖕 𐖖 𐖗 𐖘 𐖙 𐖚 𐖛 𐖜 𐖝 𐖞 𐖟 𐖠 𐖡 𐖢 𐖣 𐖤 𐖥 𐖦 𐖧 𐖨 𐖩 𐖪 𐖫 𐖬 𐖭 𐖮 𐖯 𐖰 𐖱 𐖲 𐖳 𐖴 𐖵 𐖶 𐖷 𐖸 𐖹 𐖺 𐖻 𐖼 𐖽 𐖾 𐖿 𐗀 𐗁 𐗂 𐗃 𐗄 𐗅 𐗆 𐗇 𐗈 𐗉 𐗊 𐗋 𐗌 𐗍 𐗎 𐗏 𐗐 𐗑 𐗒 𐗓 𐗔 𐗕 𐗖 𐗗 𐗘 𐗙 𐗚 𐗛 𐗜 𐗝 𐗞 𐗟 𐗠 𐗡 𐗢 𐗣 𐗤 𐗥 𐗦 𐗧 𐗨 𐗩 𐗪 𐗫 𐗬 𐗭 𐗮 𐗯 𐗰 𐗱 𐗲 𐗳 𐗴 𐗵 𐗶 𐗷 𐗸 𐗹 𐗺 𐗻 𐗼 𐗽 𐗾 𐗿 𐘀 𐘁 𐘂 𐘃 𐘄 𐘅 𐘆 𐘇 𐘈 𐘉 𐘊 𐘋 𐘌 𐘍 𐘎 𐘏 𐘐 𐘑 𐘒 𐘓 𐘔 𐘕 𐘖 𐘗 𐘘 𐘙 𐘚 𐘛 𐘜 𐘝 𐘞 𐘟 𐘠 𐘡 𐘢 𐘣 𐘤 𐘥 𐘦 𐘧 𐘨 𐘩 𐘪 𐘫 𐘬 𐘭 𐘮 𐘯 𐘰 𐘱 𐘲 𐘳 𐘴 𐘵 𐘶 𐘷 𐘸 𐘹 𐘺 𐘻 𐘼 𐘽 𐘾 𐘿 𐙀 𐙁 𐙂 𐙃 𐙄 𐙅 𐙆 𐙇 𐙈 𐙉 𐙊 𐙋 𐙌 𐙍 𐙎 𐙏 𐙐 𐙑 𐙒 𐙓 𐙔 𐙕 𐙖 𐙗 𐙘 𐙙 𐙚 𐙛 𐙜 𐙝 𐙞 𐙟 𐙠 𐙡 𐙢 𐙣 𐙤 𐙥 𐙦 𐙧 𐙨 𐙩 𐙪 𐙫 𐙬 𐙭 𐙮 𐙯 𐙰 𐙱 𐙲 𐙳 𐙴 𐙵 𐙶 𐙷 𐙸 𐙹 𐙺 𐙻 𐙼 𐙽 𐙾 𐙿 𐚀 𐚁 𐚂 𐚃 𐚄 𐚅 𐚆 𐚇 𐚈 𐚉 𐚊 𐚋 𐚌 𐚍 𐚎 𐚏 𐚐 𐚑 𐚒 𐚓 𐚔 𐚕 𐚖 𐚗 𐚘 𐚙 𐚚 𐚛 𐚜 𐚝 𐚞 𐚟 	

Таблица 3 – Процентное содержание служебных знамен в группах

№ группы	Знамена	% служебных знамен
I		100
II		71,4
III		23,3
IV		1,23

Для оценки возможной связанности знамен между собой были проведены дополнительные исследования – построены конкордансы для двух, трех и более сочетаний знамен, частота встречаемости которых подчиняется экспоненциальному закону (закону Ципфа). Например, из 6254 трехзнаменных сочетаний по одному разу встретились 2576, по 2-5 раз – 2919, 6-50 раз – 724, 50-100 раз – 19, больше 100 раз – 16 комбинаций. Наиболее частотные из них представлены в таблице 4.

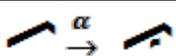
Полученные результаты можно рассматривать как подтверждение выдвинутой гипотезы о наличии в знаменных песнопениях сложной семиотической структуры, синтаксических связей.

Таблица 4 – Наиболее частотные сочетания по три знамени

	257
	194
	174
	157
	137
	136
	136
	133
	131

На третьем этапе работ были предложены информационные и математические модели описания некоторых компонент системы знаменных песнопений. С точки зрения синтаксиса среди знамен были выделены три типа отношений (Таблица 5).

Таблица 5 – Три типа отношений в синтаксисе знаменных песнопений

Вид отношения	Описание	Пример
α – отношение:	Знамя Z_1 состоит в α – отношении со знаменем Z_2 , если Z_2 является	

$Z_1 \xrightarrow{\alpha} Z_2$	производным от Z_1 .	
β – отношение: $Z_1 \xrightarrow{\beta} Z_2$	Знамя Z_1 состоит в β – отношении со знаменем Z_2 , если в структуре песнопения Z_2 непосредственно следует за знаменем Z_1	
Вероятностное β – отношение: $Z_1 \xrightarrow{\beta} Z_2 (P_i)$	Если за знаменем Z_1 может следовать несколько знамен, то конкретное знамя (Z_2) следует с вероятностью P_i .	
γ – отношение: $Z_1 \xrightarrow{\gamma} Z_2$ $Z_2 \xrightarrow{\gamma} Z_1$	Знамя Z_1 состоит в γ – отношении со знаменем Z_2 , если эти знамена находятся в общем контексте (фразе, предложении, песнопении).	

Правила употребления знамен могут быть представлены в виде **знаменного тезауруса**, структура которого представлена на рисунке 7 и включает синтаксические, семантические и другие отношения. Результаты построения тезауруса оформляются в виде словарных статей, каждая из которых включает в себя следующую информацию:

- *Знамя*, которое является заголовком словарной статьи.
- *Базовое знамя* (**α – отношение**).
- *Абсолютная частота знамени* — числовая характеристика частоты встречаемости знамени в рукописи.
- *Знамена, непосредственно связанные с ключевым знаменем* — те знамена, которые следуют сразу за ключевым знаменем (**β – отношение**).
- *Знамена, контекстно связанные с ключевым понятием* — те знамена, которые встречаются вместе с ключевым знаменем в одном контексте (**γ – отношение**).

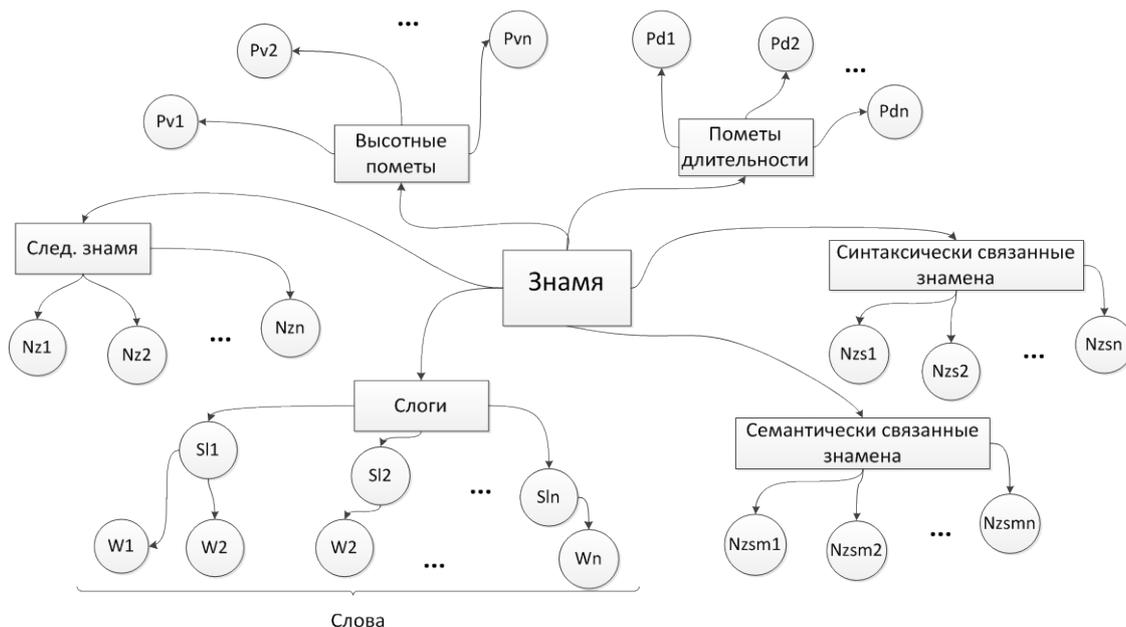


Рисунок 7. Структура знаменного тезауруса

На четвертом этапе были разработаны алгоритмы и специализированные программные средства, а также проведены исследования, которые выявили 14 основных (базовых) знамен. Применяя к ним первый тип правила (**α – отношение**) можно получить все остальные знамена (Таблица 6 и 7).

Таблица 6 – Правила для образования производных знамен

Производные знамена		Правила написания и значение	Пример
1. Задержка		Пишется справа от знамени. Удлиняет последний звук знамени вдвое.	
2. Отсечка		В отличие от задержки сокращает последний звук знамени вдвое	
3. Подчашие		Пишется под серединой знамени. Добавляет к последнему звуку знамени один тихий звук в нисходящем порядке	
4. Подвертка		Пишется под правым концом знамени. Добавляет к последнему звуку один борзый нисходящий звук. При этом общая длительность знамени не изменяется.	
5. Облачко		Пишется над знаменем. Добавляет один краткий нисходящий звук. При этом общая длительность знамени не изменяется.	
6. Сорочья ножка		Пишется справа или сверху знамени. Прибавляет один краткий звук вверх. В сочетании со светлыми крюком и статьей означает высокое исполнение этих знамен.	

7. Признак II ступени «согласия» (1)		Означает нахождение знамени на II ступени «согласия»	
8. Признак II ступени «согласия» (2)		Означает нахождение знамени на II ступени «согласия»	
9. Признак III ступени «согласия» (1)		Означает нахождение знамени на III ступени «согласия»	
10. Признак III ступени «согласия» (2)		Означает нахождение знамени на III ступени «согласия»	

Таблица 7 – Пример применения правил первого типа для образования производных знамен

Базовое знамя		Преобразование	Производное знамя
Стопица		Прибавление тушевого признака III ступени «согласия»	
Стопица		Прибавление тушевого признака II ступени «согласия»	
Переводка		Прибавление тушевого признака III ступени «согласия»	
Переводка		Прибавление указательной пометы "подвертка"	
Крюк мрачный		Прибавление тушевого признака III ступени «согласия»	

Это позволило оптимизировать систему интерактивного ввода песнопений через специально разработанный веб-сервис IPSM [14]. Для организации списка выбора знамени в веб-приложении все знамена были сгруппированы по схожести начертания и разделены на 6 основных групп, в каждой из которых были выделены подгруппы:



Рисунок 8. Фрагмент распределения знамен по схожести начертания

При выявлении синтаксических связей второго типа (***В* – отношение**) были построены матрицы смежности, в которых сведены вместе частоты следования знамен друг за другом (рисунок 9). Дальнейшая нормировка относительно общего количества знамен позволяет построить стохастическую таблицу (матрицу) переходов цепи Маркова.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3		1									1
4		3	13	66	4	12					1
5				5	33					1	2
6					1			1	4		5
7				2		1					
8				1	1		1			1	2
9								8			
10				1				2			1
11								1			
12				3							
13				6	3			2			1
14											
15				6		7					3
16				16	1	3					4
17				1	1						
18				1					1		

Рисунок 9. Матрица смежности (следования знамен друг за другом)

При выявлении синтаксических связей третьего типа (***У* – отношение**) использовался дистрибутивно-статистический анализ, который определял коэффициенты «силы связи» знамен по формулам [12], представленным в таблице 8. Пример

результатирующей матрицы связанности для меры Танимото представлен на рисунке 10.

Таблица 8 – Формула силы связи дистрибутивно-статистического анализа

№	Формула силы связи	Диапазон значений
1	$K_{AB} = \frac{f_{AB}}{f_A + f_B - f_{AB}} \text{ [Танимото]}$	(-5 ; 8)
2	$K_{AB} = f_{AB} - \frac{f_A \cdot f_B}{N} \text{ [Мэйрон]}$	(0.0002; 0.1678)
3	$K_{AB} = \frac{f_{AB} - \frac{f_A \cdot f_B}{N}}{\sqrt{\frac{f_A \cdot f_B}{N}}} \text{ [Деннис]}$	(0.6; 1222.7)
4	$K_{AB} = \lg \frac{\left(f_{AB} \cdot N - f_A \cdot f_B - \frac{N}{2} \right)^2 \cdot N}{f_A \cdot f_B \cdot (N - f_A) \cdot (N - f_B)} \text{ [Стайлз]}$	(4.9; 10.5)

Знамена	Значения
103	-74-477(0.023), 176(0.021), 76(0.036), -414-28(0.026), 167(0.015), 140(0.028), -140-414-28-453(0.021), 165(0.013)...
-74-477	76(0.047), 167(0.011), 97(0.027), 46(0.036), -405-94(0.053), -139-405(0.007), 166(0.038), 96(0.047), 427(0.014), 7...
76	76(-1), 77(0.284), 122(0.045), 174(0.162), 140(0.184), 166(0.563), 75(0.355), -72-93(0.198), 2(0.051), -140-153(0.0...
77	121(0.112), 76(0.284), 77(-1), 72(0.151), 176(0.279), 75(0.383), -74-27(0.087), -72-58-195(0.043), 88(0.154), 166(0...
121	-73-192(0.083), 76(0.158), 140(0.2), 126(0.008), 407(0.047), 8(0.054), 166(0.148), 402(0.124), 165(0.083), -414-10...
138	89(0.13), 74(0.119), -438-94(0.007), 75(0.119), -73-93(0.061), 165(0.125), -72-106-195(0.034), 122(0.261), 121(0.1...
89	121(0.075), -72-94(0.199), 441(0.137), 72(0.042), -72-94-153(0.008), 74(0.04), 85(0.04), -74-93(0.013), -73-93(0.07...
122	138(0.261), 165(0.059), 77(0.128), 167(0.078), 153(0.034), 8(0.065), 140(0.068), 429(0.055), -139-405(0.047), 76(...
174	75(0.264), 76(0.162), 88(0.146), 105(0.059), -73-27(0.012), 441(0.159), -405-438-180-438(0.004), 402(0.593), -405...
75	75(-1), 73(0.073), 176(0.549), 76(0.355), 175(0.137), 41(0.005), 152(0.139), 89(0.04), 441(0.218), 166(0.208), 126(...
140	121(0.2), 76(0.184), -74-69(0.01), 88(0.235), -73-27(0.023), 429(0.478), -74-192(0.021), -74-27(0.182), 138(0.09), -...
166	174(0.164), 73(0.16), 429(0.59), 153(0.031), -74-477(0.038), 0(0.054), 431(0.059), 126(0.008), -73-477(0.008), 87(...
88	441(0.122), 2(0.047), 126(0.011), -74-153(0.027), 74(0.455), -414-192(0.045), 8(0.036), -73-72(0.013), -140-153(0.0...

Рисунок 10. Матрица связанности знамен для меры Танимото

Итоговые результаты всех исследований объединены и представлены в форме тезауруса, в качестве меры силы связи выбрана мера Танимото.

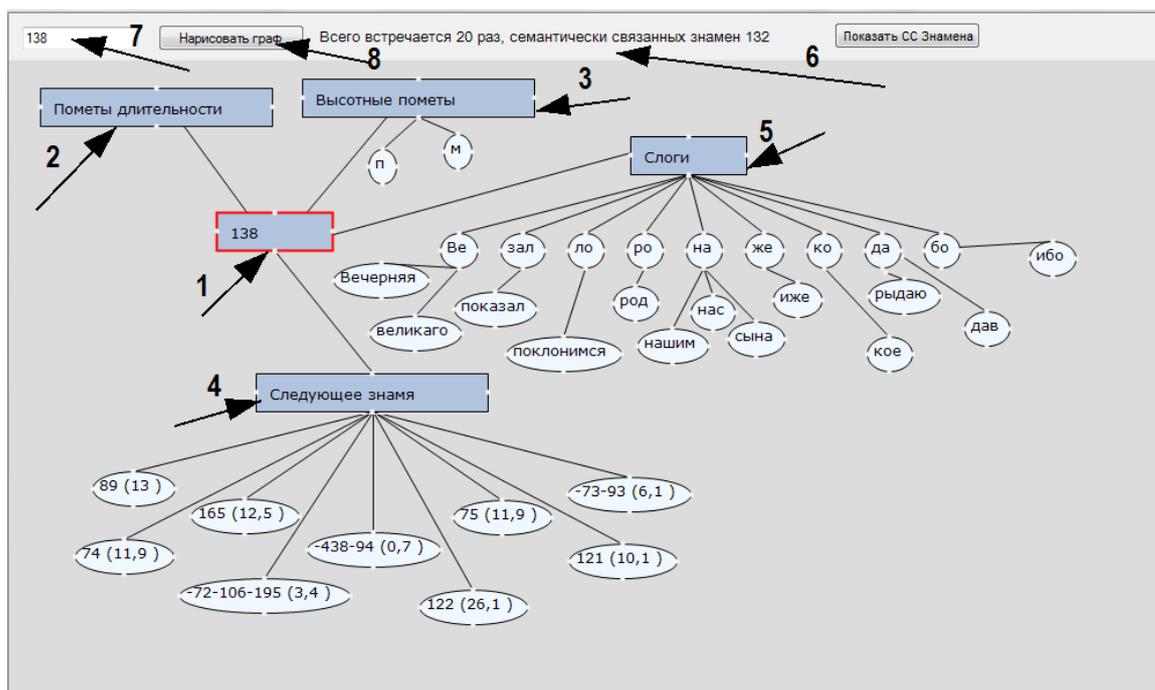


Рисунок 11. Фрагмент тезауруса знаменных песнопений

Выводы

В ходе работы над проектом были проанализированы песнопения из книги «Круг знаменных песнопений», которые содержат 24911 употреблений 772 различных знамен. Результаты проведенных исследований подтверждают гипотезу о наличии сложной семиотической системы в знаменных песнопениях:

- В общем случае знамени соответствует несколько (последовательность) современных нот, а в некоторых случаях одно знамя может заменяться группой других знамен (явление тайнозамкненности). По начертанию знамена можно разделить на базовые и производные, которые образуются путем добавления признаков;
- Частота встречаемости знамен в песнопениях распределена по экспоненциальному закону, что свидетельствует о сильном разбросе вероятности их использования.
- Показано, что вероятность использования (встречаемости) знамен зависит от контекста (окружающих или предшествующих знамен). Среди сочетаний по три знамени можно выделить такие, которые являются потенциальными "ядрами" попевок (более сложных мелодических конструкций);
- Выявлено, что есть большое количество сочетаний знамен, которые никогда не встречаются, но при этом есть малое количество комбинаций, которые

встречаются гораздо чаще, чем другие. Это позволяет статистически выделить (подтвердить) наличие «служебных» знамен.

В ходе исследований выявлены три основных типа связи, которые позволяют формализовать описание песнопений с точки зрения синтаксиса. В качестве математического аппарата для их описания выбраны методы дистрибутивно-статистического анализа.

Для вычисления коэффициента «силы связи» знамен рассмотрены различные подходы, среди которых для дальнейшей работы выбрана метрика Танимото. Метрики Мэйрона и Денниса исключены, т.к. требуют независимости знамен (что опровергается экспериментально), а использование формулы Стайлза дает очень маленький разброс значений (в диапазоне от 4,9 до 5).

Применение методов компьютерной лингвистики для анализа знаменных песнопений, разработанные математические модели и алгоритмы, а также результаты экспериментов являются оригинальными и представляют научную новизну в сфере изучения инфокогнитивных технологий.

Практическая ценность проделанных работ состоит в разработке программных модулей для ввода, представления и анализа песнопений, а также получении новых статистических данных об устойчивых сочетаниях знамен, что может быть использовано для совершенствования средств обработки и изучения знаменной нотации.

Полученные результаты исследований создают основу для дальнейшего изучения знаменных песнопений и других музыкальных произведений, выявления семантических и прагматических отношений, создании новых классов персональных автоматизированных систем на базе инфокогнитивных технологий.

Дополнительная информация о проекте и проведенных исследованиях представлена в Интернете по адресу <http://it-claim.ru/semio>.

Литература

1. Philip Tagg. A Short Prehistory of Western Music, 2002.
2. Wallin, N. L., Merker, B., and Brown, S. (Eds.). The Origins of Music. Cambridge, MA: MIT Press, 2000.
3. Narmour, E. The Influence of Embodied Registral Motion on the Perception of Higher-Level Melodic Processes. In Cognitive Bases of Music Communication, 1992.
4. Jean-Jacques Nattiez, Katharine Ellis. Music Analysis, 1989.
5. C.Grilo, F.Machado, A.Cardoso. Paradigmatic Analysis using Genetic Programming.

6. Lerdahl, F. and Jackendoff, R. (1983) A generative Theory of Tonal Music, The MIT Press, Cambridge.
7. М. В. Бражников. Древнерусская теория музыки. - Л.: Музыка, 1972.
8. Филиппович А.Ю., Смоляков Б.Г. Компьютерная семиография //Книга и мировая цивилизация: Материалы XI Междунар. науч. конф. по проблемам книговедения (Москва, 20-21 апр. 2004 г.): В 4 т./ [Сост. В.И.Васильев, М.А.Ермолаева, А.Ю.Самарин; Отв. ред. В.И.Васильев, Б.В.Ленский]. – М.:Наука, 2004. — Т1. – 2004. – С.398-401.
9. *Филиппович А.Ю., Даньшина М.В., Даньшина И.В.* Методы компьютерной семиотики в исследованиях древнерусской духовно-музыкальной письменности // XII Международная научная конференция по проблемам книговедения "Наука о книге. Традиции и инновации" - М.:Наука, 2009.
10. Даньшина И.В., Даньшина М.В. Статистическое исследование знаменной системы на примере двух гласов Октоиха // Интеллектуальные технологии и системы. Сборник учебно-методических работ и статей аспирантов и студентов. Выпуск 9. М.: НОК "CLAIM", 2007.
11. Смоляков Б.Г. К проблеме расшифровки знаменной нотации. Вопросы теории музыки. Выпуск 3, М. 1975.
12. Филиппович Ю.Н., Прохоров А.В. Семантика информационных технологий: опыты словарно-тезаурусного описания. / Серия "Компьютерная лингвистика". Вступ. Статья А.И.Новикова. М.: МГУП, 2002.
13. Мечковская Н.Б.. Семиотика. Язык. Природа. Культура: Курс лекций. Учеб. пособие для студ. филол., лингв, и переводовед. фак. высш. учеб. заведений / Н. Б. Мечковская. — 2-е изд., испр. —М. Издательский центр «Академия», 2007. — 432 с.
14. Даньшина М.В. Программа для ввода и обработки семиографических песнопений IPISM. Информационные технологии и письменное наследие: материалы междунар. науч. конф. (Уфа, 28-31 октября 2010 г.)/ отв. Ред. В.А.Баранов. - Уфа;Ижевск: Вагант, 2010.