

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

УДК 004.652, 004.891
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-25-35>

Поступила в редакцию 16.07.2020
Received 16.07.2020

Принята к публикации 17.08.2020
Accepted 17.08.2020

Агрегация и индексирование данных нескольких источников на основе графовой модели в базах данных медицинских экспертных систем

А. В. Курочкин[✉], В. С. Садов

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
[✉]E-mail: alex.v.kurochkin@gmail.com

Аннотация. Проблема агрегации информации является одной из ключевых при разработке и внедрении экспертных систем в медицинской практике. Как правило, общая информация о пациенте, а также данные о проводимых обследованиях являются частью нескольких разобщенных информационных систем, в каждой из которых используется своя схема представления и хранения информации. В работе рассматривается решение по агрегации данных об обследованиях и пациентах в медицинских учреждениях с использованием предложенного механизма формальных проекций, который позволяет унифицировать процесс извлечения информации из различных видов источников. Для представления информации о пациентах и обследованиях предлагается применение графовой модели, способствующей оптимизации поддержки запросов по отдельному пациенту и по совокупности исторических данных отдельного вида обследования. Показывается, что такое представление может быть использовано для централизованной обработки данных различными методами интеллектуального анализа.

Ключевые слова: агрегация данных, графовые схемы, графовые базы данных, медицинские базы данных, медицинские экспертные системы

Для цитирования. Агрегация и индексирование данных нескольких источников на основе графовой модели в базах данных медицинских экспертных систем / А. В. Курочкин, В. С. Садов // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 25–35. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-25-35>

Data aggregation and indexing support from multiple sources using graph model in medical expert system databases

Aliaksandr V. Kurachkin[✉], Vasili S. Sadau

Belarusian State University, Minsk, Belarus
[✉]E-mail: alex.v.kurochkin@gmail.com

Abstract. One of the key problems in developing and integrating expert systems for medical research is the problem of data aggregation. Most of the times, general information about the patient and data about undergone research procedures exist as part of several disconnected information systems, each using its own schema for presenting and storing information. The paper proposes a solution to aggregate research and patient data in medical establishments using formal projections mechanism, which allows to unify data extraction from separate data sources. Graph-based patient and research record representation is introduced, which allows to support and optimize complex queries for single patient and for a set of historical data from single research. Proposed representation mechanism is also shown to be effective for centralized processing using various data mining and intelligent analysis techniques.

Keywords: data aggregation, graph schemas, graph databases, medical databases, medical expert systems

For citation. Kurachkin A. V., Sadau V. S. Data aggregation and indexing support from multiple sources using graph model in medical expert system databases. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 25–35 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-25-35>

Введение. Медицинские экспертные системы находят все более широкое распространение в различных отраслях медицинской практики, в том числе хранении и сборе статистической информации, поддержке диагностики, а также планировании терапевтических мероприятий. По характеру входных данных медицинские экспертные системы можно условно разделить на системы, основывающиеся на данных, и системы, основывающиеся на правилах [1, 2].

Проблема извлечения исходных данных является ключевой как для экспертных систем на основе данных и гибридных систем, так и для систем на основе правил. Во многих случаях исходные данные для обучения систем на основе данных, а также для использования в качестве входных в системах на основе правил представлены разобщенными источниками [3]. Каждый из источников может предоставлять свой механизм доступа к данным (чтение из файловой системы, прямое подключение и использование языка запросов некоторой системы управления базами данных (СУБД), извлечение данных из сервисов посредством REST API, различные виды программных интерфейсов доступа и т. п.). Кроме того, в медицинской практике часто наблюдается значительное разнообразие инструментов по хранению и обработке информации о пациентах и отдельных обследованиях, так как множество программных решений распространяется совместно с медицинским оборудованием и не поддерживает автоматическую интеграцию с централизованной базой данных. Например, многие аппараты для проведения томографического обследования подразумевают выгрузку данных только на лазерные компакт-диски в формате DICOM.

В качестве решения проблемы извлечения исходных данных в работе предлагается алгоритм агрегации информации из различных источников с помощью механизма формальных проекций, основанный на адаптации информации из различных источников в строгую графовую схему и поддерживающий императивный (в виде последовательности команд) и декларативный (в виде описания) стиль задания самого процесса проекции разных форматов информации. Такое представление приближено к семантическому графу и открывает дополнительные возможности для интероперабельного взаимодействия в системах анализа информации.

Графовая модель данных для обработки результатов медицинских обследований. Графовые модели данных основаны на представлении всех сущностей и связей, находящихся в системе, в виде вершин и ребер некоторого ориентированного мультиграфа. В графовых моделях сущности, соответствующие вершинам графа, и сущности, соответствующие ребрам графа, являются в общем виде равноправными. Сущности, ассоциирующиеся с вершинами, задают информацию о некотором объекте, а сущности, ассоциирующиеся с ребрами, – информацию об отношении, в котором сущности в вершинах находятся друг относительно друга. Поскольку модель основана на мультиграфе, все отношения между узлами в терминах реляционной алгебры по определению являются отношениями типа «многое ко многому». При этом ребра, как и узлы, могут содержать в себе некоторую скалярную информацию в атрибутах с фиксированной или произвольной схемой [4].

Более формально обычный граф G представляет собой кортеж (V, E) , состоящий из множества вершин V и множества ребер $E \subseteq V \times V$. Графовая схема данных S может быть задана в виде модели графа с метками и свойствами, которая задается совокупностью множеств

$$S = (V, E, L, l_V, l_E, K, W, p_V, p_E), \quad (1)$$

где L – множество меток; $l_V : V \rightarrow 2^L$ и $l_E : E \rightarrow 2^L$ – функции вычисления меток как подмножества множества L для вершин и ребер соответственно; K – множество ключей (названий) свойств; W – множество значений свойств; $p_V : V \rightarrow 2^{K \times W}$ и $p_E : E \rightarrow 2^{K \times W}$ – функции, ставящие в соответствие вершинам $v_i \in V$ и ребрам $e_i \in E$ некоторое множество пар «ключ –

значение» $\{(k_i, w_i)\}$, $k_i \in K$, $w_i \in W$, а 2^X используется для обозначения множества всех подмножеств (булеана) известного множества X . Метки позволяют ввести понятия типа ребра и типа вершины, как правило, указывающего на тип доменной сущности, который соответствует этой вершине или ребру в графовой схеме. Метки могут применяться для группировки и выполнения запросов без привязки к конкретному входному узлу графа. Свойства моделируются в виде пар «ключ – значение» и используются для представления атрибутов графовой схемы. При этом можно дополнительно ввести связь конкретной метки $l_i \in L$ вершины или ребра со схемой атрибутов, соответствующей данной вершине или ребру, с помощью проекции вида

$$S_L(l_i): L \rightarrow 2^{K \times V}. \quad (2)$$

Хотя проекция (2) не является обязательной для задания графовой схемы данных в виде (1), на практике информация о наличии определенных атрибутов, их типе и ограничениях уже известна и задается метамоделью данных, поэтому такая проекция может использоваться дополнительно для введения типизации из метамодели в полученную схему и для упрощения доступа к этой схеме с применением программных интерфейсов.

При обработке данных медицинских систем различные виды обследований требуют разного представления, а само представление данных об обследовании определяется используемыми аппаратными и программными средствами диагностики. Можно выделить две основные составляющие с точки зрения формирования выборок, относительно которых должна строиться итоговая схема: относительно пациента и относительно обследования. Выборки относительно пациента подразумевают работу с отдельной медицинской картой и историей болезни пациента с агрегацией информации по различным видам обследований. Выборки относительно обследования подразумевают агрегацию результатов обследований и соответствующих диагнозов или исходов по всей совокупности пациентов, которые проходили этот вид обследования. В первом случае выборка осуществляется для оказания медицинских услуг отдельному пациенту и формирования общего представления о клинической картине с течением времени. Во втором случае выборка осуществляется для статистического анализа по некоторой конкретной патологии или конкретному виду обследования для вывода новых наблюдений по всему объему данного исследования, а также для разработки и тестирования медицинских экспертных систем и систем поддержки принятия решений по конкретному виду обследования [5].

Агрегация информации в медицинских системах с использованием механизма формальных проекций. Как уже упоминалось, одними из ключевых особенностей сбора информации в медицинских системах являются разнородность и разноплановость источников данных, систем обработки и долговременного хранения информации. В этой связи для организации централизованной обработки требуется введение дополнительного механизма преобразования данных из произвольного вида, который используется в существующих программных и аппаратных решениях, в тот вид, который был бы удобен для централизованной статистической обработки, индексирования и поддержки произвольных запросов.

Основной сложностью построения универсального механизма агрегации данных из различных источников является тот факт, что конечные схемы данных в каждом из таких источников могут значительно отличаться не только присутствующими в них сущностями, атрибутами и связями, но и самим подходом к организации данных в целом (рис. 1).

Аппаратные системы без собственного хранилища обычно представляют собой некоторую единицу диагностического оборудования для проведения специализированного обследования, которая связывается с персональным компьютером по некоторому проприетарному протоколу уровня драйвера и позволяет (напрямую или с помощью комплектного программного обеспечения) выгружать результаты в файловую систему компьютера в некотором фиксированном формате. Такие системы имеют ряд особенностей при программном доступе к данным, поскольку формат для выгрузки информации, как правило, является проприетарным и его интерпретация может быть затруднена.

Аппаратные системы с собственным хранилищем представляют собой интегрированное аппаратное диагностическое решение с встроенным или подключенным компьютером, на котором установлено специализированное программное обеспечение, позволяющее работать с данными, получаемыми с оборудования, а также хранить историческую информацию о проведенных обследованиях.

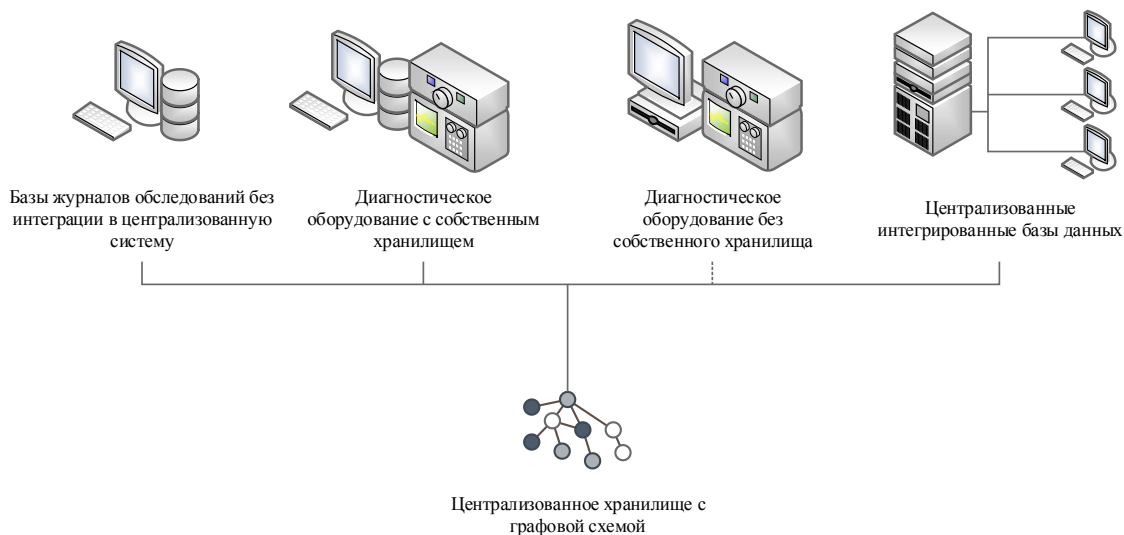


Рис. 1. Структурная схема агрегации данных из различных типов медицинских систем в централизованное хранилище с графовой схемой

Базы данных или журналы обследований без интеграции в центральную систему являются наиболее распространенным видом хранения исторических данных о проводимых обследованиях. Такие системы могут быть представлены базой данных или сводной таблицей, которая заполняется вручную специалистом, проводящим обследование. Для этих систем характерно наличие строгой схемы, вариативности в описании однотипных данных даже с учетом имеющейся схемы из-за ошибок и вводимых условных обозначений, а также, в некоторых случаях, денормализованной структуры.

Централизованные интегрированные базы данных медицинского учреждения представляют собой единую систему учета пациентов в рамках конкретного медицинского учреждения (карточки, истории болезней и т. п.) в виде серверного приложения, подключение к которому может осуществляться с помощью клиентских приложений на рабочих местах специалистов. Как правило, в рамках медицинского учреждения разворачивается не более одной системы такого типа. Кроме того, такие системы имеют строгую схему и предоставляют достаточно простой клиентский программный интерфейс, который значительно облегчает доступ к чтению с любого узла, подключенного к серверу.

Каждый из видов информационных систем требует отдельного подхода к извлечению данных для их дальнейшего использования в графовой схеме. Чтобы упростить задачу агрегации данных об одних и тех же объектах в различных частях медицинских систем, предлагается использовать механизм формальных проекций [6]. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма агрегации информации с использованием формальных проекций. В основе предложенного алгоритма лежит метамодель – описательное представление отдельных типов выходной информации, по которой в дальнейшем выполняется формальная проекция. Особенностью алгоритма является задание модификаций графовой схемы в виде последовательности команд в декларативном стиле, что позволяет предоставлять реализации самих модификаций независимо от их описания. Алгоритм генерации такой последовательности команд с помощью формальной проекции показан на рис. 3.

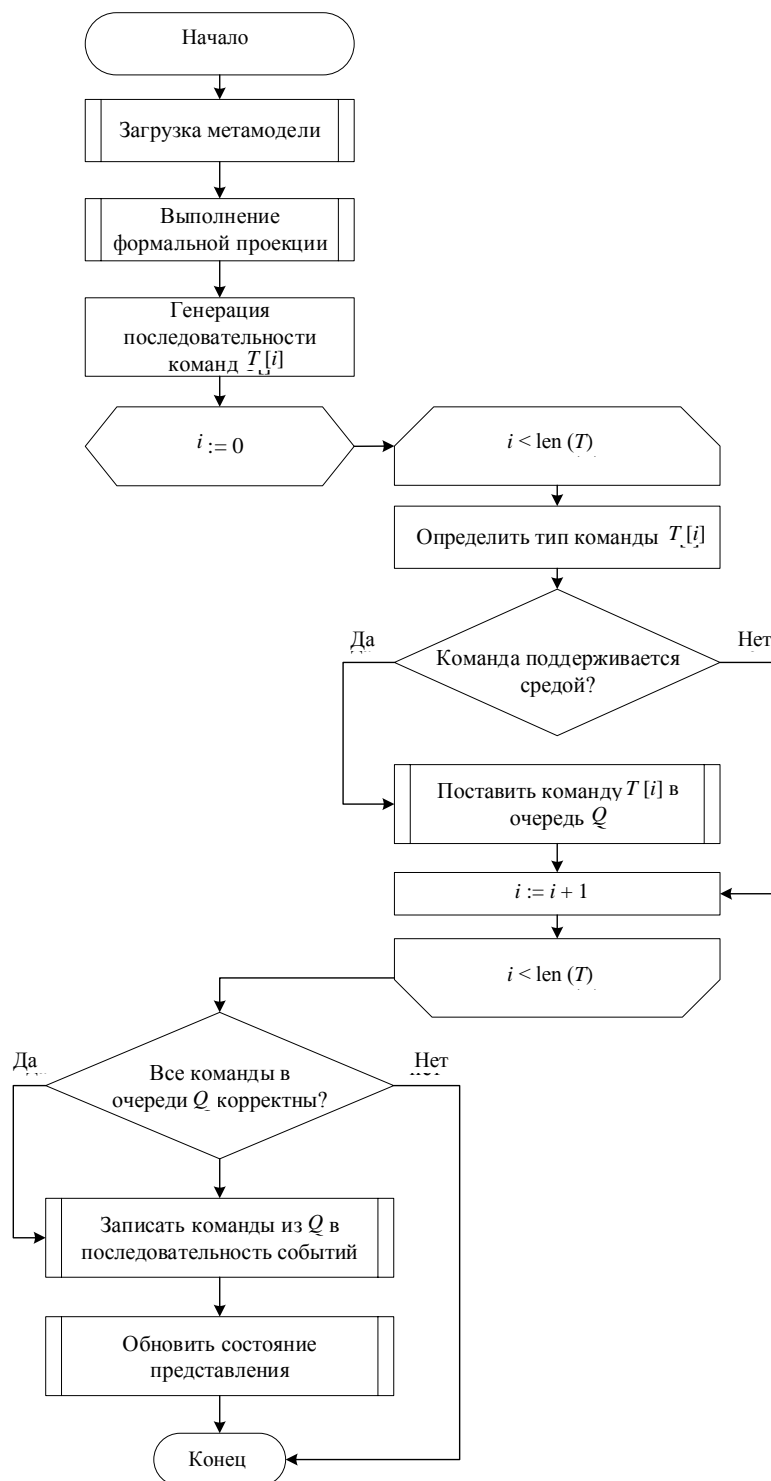


Рис. 2. Алгоритм извлечения информации из отдельного источника для обновления централизованного состояния представления с использованием формальных проекций

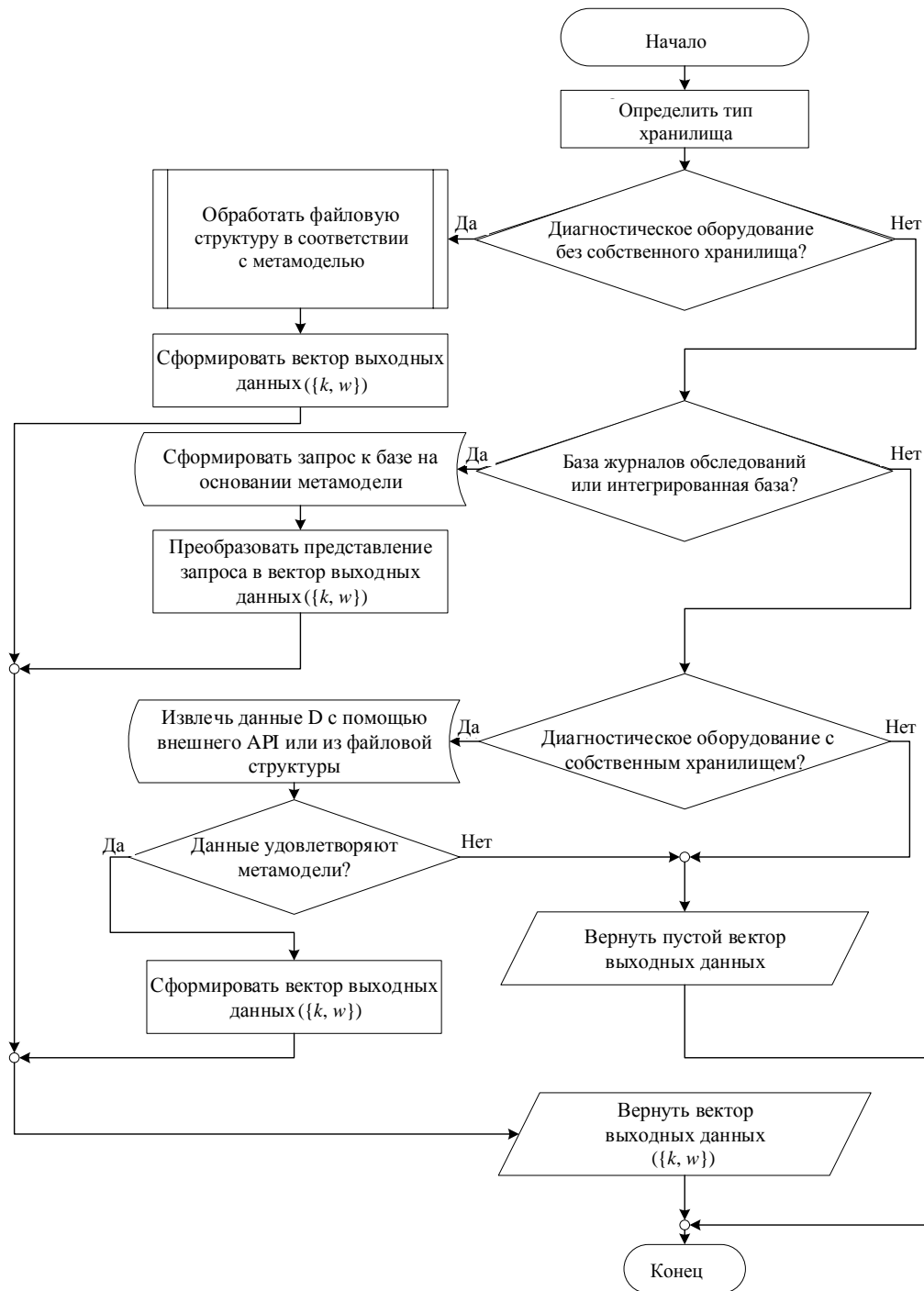


Рис. 3. Алгоритм формальной проекции – генерации вектора выходных данных по метамодели на основании имеющейся в системе информации в зависимости от вида ее хранилища

Под формальной проекцией подразумевается процедура произвольного вида, представленная в виде программы или сценария, которая по запросу позволяет принять данные из конкретной системы, относящейся к одному из описанных типов, и сгенерировать по этим данным набор декларативных описаний операций модификации информации в рамках графовой схемы по некоторой начальной временной метке. По сути, подобный сценарий или процедура представляют собой единичную проекцию для конкретной информационной системы, поэтому при наличии набора таких проекций итоговый набор инструкций для актуализации графовой схемы является сверткой по этим проекциям. Более строго формальная проекция может быть пред-

ставлена в виде функции $p: X \rightarrow \{o_i\}$, где X – множество всех возможных данных в информационной системе в исходном виде, $o_i \in O$ – описание операции по модификации графовой схемы. Сбор информации осуществляется в два этапа: проекцией (map) для формирования операций и сверткой (reduce) для их выполнения – аналогично алгоритму MapReduce [4, 6]. Каждая операция o_i , в свою очередь, позволяет задавать операцию удаления или создания вершины $v_i \in V$, удаления или создания ребра $e_i \in E$, задания или удаления метки $l_i \in L$, удаления атрибута по значению ключа $k_i \in K$ или модификации атрибута по ключу $k_i \in K$ и новому значению $w_i^* \in W$. Модификация самой схемы представлена в виде оператора

$$f_T : (S, \{o_i\}) \rightarrow S. \quad (3)$$

Смысл оператора модификации схемы (3) заключается в генерации ее нового представления в соответствии с набором описаний операций по модификации. Оператор является линейным относительно операции объединения множеств операций O .

Как показано на рис. 3, формальные проекции реализуются различными способами для разных видов хранилищ в исходных системах. Для аппаратных систем без собственного хранилища проекции осуществляются на основании некоторого представления (как правило, файлового) по результатам обследования. При работе с системами с собственным хранилищем и интегрированными системами проекция может осуществлять выборку по данным из хранилищ этих систем, а также синхронизироваться с собственным хранилищем по расписанию. Кроме того, если система поддерживает уведомления о модификации, синхронизация может быть инициирована ими. При работе с базами данных или журналами обследований одним из вариантов организации проекции является предоставление интерфейса для ввода данных специалистом, проводящим обследование.

Основные составляющие графовой схемы для обработки результатов медицинских исследований. Использование графовых моделей при проектировании схемы хранения данных для медицинских систем обосновывается следующими обстоятельствами:

1. В качестве вершин в модели предлагается вводить узлы, соответствующие пациентам, и узлы, соответствующие каким-либо видам обследования. При такой организации данных ребра, связывающие узел конкретного пациента с узлом определенного вида обследования, представляют собой протокол прохождения отдельным пациентом данного вида обследования.

2. При работе с пациентами удобно в качестве входной точки использовать узел, соответствующий конкретному пациенту: при обходе только ребер соответствующего узла будет доступна информация о всех протоколах обследования этого пациента вне зависимости от их вида. Такое представление удобно для просмотра общей истории болезни и может использоваться для постановки комплексного диагноза.

3. При работе с конкретным диагностическим оборудованием или конкретной областью медицинской диагностики в качестве входной точки может использоваться узел, соответствующий определенному виду обследования. Такое представление удобно для исследования в рамках конкретного заболевания или области диагностики для сбора статистической информации о результатах проводимого обследования, установления зависимостей, проверки статистических гипотез и разработки систем поддержки принятия решений на основании исторических данных.

Схема данных может быть конкретизирована типизацией для узлов, соответствующих пациентам, а также для связей как произвольного, так и конкретного типа обследования. Пример базы данных, реализованной по описанной графовой схеме и визуализированной с помощью СУБД Neo4j [7], показан на рис. 4. На представленной схеме выделено три типа узлов: пациент, обследование и врач – и два типа связей: протокол обследования как связь между пациентом и обследованием и специализация врача как связь между врачом и обследованием. При этом связи, соответствующие протоколам обследования, имеют некоторую совокупность обобщенных атрибутов (например, дату проведения обследования) и различные схемы в зависимости от целевого обследования. В частности, для обследования, соответствующего оптической коге-

рентной томографии, в протоколе могут указываться различные измеренные функциональные показатели. Кроме того, количество связей также не ограничено, так как модель представляет собой мультиграф. Это означает, что можно создавать несколько отдельных протоколов одного и того же обследования одного и того же пациента (например, как показано на рис. 4) и записывать в отдельные протоколы результаты оптической когерентной томографии для правого и левого глаза.



Рис. 4. Наполнение графовой схемы для обработки результатов медицинских обследований для двух пациентов, двух различных видов обследования и четырех протоколов обследований

Ключевой особенностью предложенной схемы является простота обхода полученного графа для извлечения соответствующей информации о пациенте и обследованиях.

Сравнительная характеристика предложенной графовой модели и аналогичной схемы данных, выраженной с помощью реляционной или документно-ориентированной схемы, представлена в таблице. Для реляционной схемы данных, аналогичной представленной на рис. 4, необходимо использовать девять отдельных таблиц, а появление нового обследования вызывает необходимость добавлять каждый раз еще три таблицы, т. е. модифицировать схему данных, что является весьма затратной операцией.

Сравнительная характеристика асимптотической вычислительной сложности операций выборки

Тип операции	Реляционная схема	Документная схема	Графовая схема
Выборка информации по пациенту	Поиск отношения по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$	Поиск документа по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$	Поиск узла графа по индексу $O(\log n)$
Выборка информации по протоколу об обследовании	Поиск отношения по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$	Поиск документа по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$	Поиск ребра графа по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$
Выборка протоколов по пациенту	Объединение таблиц по индексу $O(m \log n)$ или по хеш-индексу $O(n)$	Выборка вложенных документов $O(1)$	Переход по связанным ребрам с единичным шагом $O(1)$
Выборка протоколов по обследованию	Объединение таблиц по индексу $O(m \log n)$ или по хеш-индексу $O(n)$	Линейный поиск с выборкой вложенных документов $O(n + m)$	Переход по связанным ребрам с единичным шагом $O(1)$

Для реализации выборки коллекций на аналогичной реляционной схеме требуется осуществлять операцию объединения таблиц, имеющую асимптотическую квазилинейную или линейную вычислительную сложность в зависимости от организации индексов. В документно-

ориентированной схеме с вложенным хранением документов выборка с одной стороны связи может осуществляться за константное время, но при этом асимптотическая сложность выборки с другой стороны связи будет близка к квадратичной. В рамках графовой схемы по ссылке на конкретный узел, связанный с пациентом, или конкретный узел, связанный с обследованием, необходим только один шаг перехода по связям (обход на глубину 1), который в современных графовых СУБД осуществляется асимптотически за время, близкое к константному, что в значительной степени влияет на производительность системы с увеличением количества обрабатываемых данных.

Изменение времени выполнения запросов с ростом количества элементов в хранилище также оценивалось экспериментально. В качестве основного нагрузочного запроса используется выборка протоколов обследований. Для реляционной схемы применялась СУБД PostgreSQL с хеш-индексами для внешних ключей, для документно-ориентированной схемы – СУБД MongoDB с вложенным хранением документов, для графовой схемы – СУБД Neo4j с предложенной архитектурой хранения данных. Все измерения проводились в режиме хранения данных в оперативной памяти на тестовом компьютере с ЦПУ Intel Core i7-8700K и 32 ГБ ОЗУ с равномерным увеличением количества записей (рис. 5).

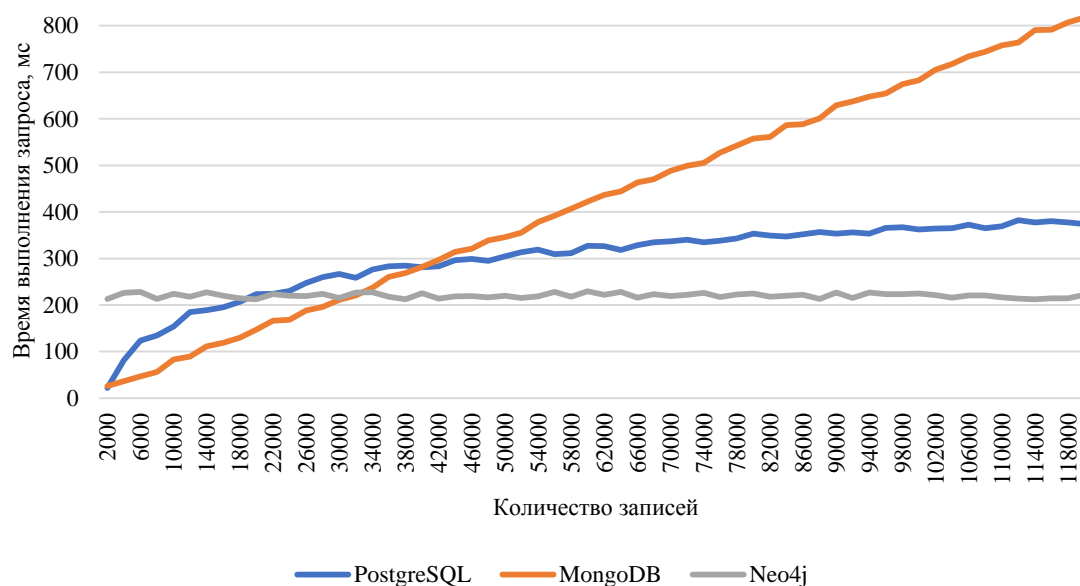


Рис. 5. Время выполнения запросов к СУБД с увеличением объема данных

Согласно представленным экспериментальным зависимостям документно-ориентированная схема показывает наибольшую производительность при небольшом количестве записей (до 22 000), но линейная асимптотическая сложность значительно увеличивает время выполнения запроса с ростом объема выборки. Следует также отметить, что линейный поиск с выборкой вложенных документов может осуществляться по пациентам, а не по протоколам, но в этом случае представленный характер зависимости будет наблюдаться у выборки по протоколам. Реляционная схема на использованных объемах данных демонстрирует логарифмический характер роста времени выполнения запроса благодаря оптимизациям операции объединения по хеш-индексу. Тем не менее уже для 18 000 записей время выполнения становится выше по сравнению с графовой схемой. Использование графовой схемы дает возможность реализовать выборку за постоянное время (хотя при передаче данных приложению может наблюдаться линейная задержка), что позволяет наиболее оптимальным образом осуществлять работу с большими объемами данных. При обработке 200 000 записей наблюдается почти двукратное ускорение по сравнению с реляционной схемой.

Полученные результаты свидетельствуют о значительно более оптимальной производительности графовой схемы при необходимости поддержки запросов и о конкретном пациенте, и о конкретном виде обследования без потери гибкости самой схемы.

Выборки для поиска конкретного пациента или конкретного вида обследования по значениям полей в графовых базах данных могут быть оптимизированы с помощью известных подходов к индексированию. Графовая схема также является намного более гибкой, поскольку не требует строгой типизации и скалярности отдельных атрибутов входящих в нее узлов и связей, что позволяет добавлять поддержку произвольных данных об обследовании без необходимости проведения миграций схемы [4, 7].

Заключение. Задача организации данных в медицинских системах является важнейшим направлением исследований. Основную сложность при построении адекватных моделей организации данных представляет необходимость работы с разнородными и разобобщенными источниками данных об обследованиях, которые помимо различных схем самих хранящихся в них данных предоставляют отличающиеся и несовместимые способы доступа к этим данным.

В работе для агрегации информации из различных источников в медицинских системах предлагается использовать механизм формальных проекций, который позволяет унифицировать процесс извлечения информации о конкретном виде обследования способом, не зависящим от формата информации и метода доступа к ней. Это дает возможность осуществить извлечение данных в общую схему. Кроме того, предлагаемый механизм может применяться в качестве промежуточного слоя доступа к данным для облегчения формирования запросов, не заменяя при этом уже существующие системы и использующиеся в них хранилища, что упрощает и ускоряет развертывание системы.

Для непосредственно обработки полученной агрегированной информации предлагается использовать графовую систему управления базами данных с размещением информации о пациентах и видах обследования в узлах графовой схемы и размещением информации о протоколах прохождения конкретного обследования некоторым пациентом в виде связей (ребер) в этой схеме. Предложенный подход позволяет оптимизировать выборку информации по совокупности обследований конкретного пациента для просмотра общей истории болезни, формирования клинической картины и упрощения постановки комплексного диагноза, а также выборку по совокупности протоколов обследований конкретного вида обследования, что дает возможность анализировать статистические зависимости, разрабатывать и тестировать медицинские экспертные системы и системы поддержки принятия решений, опирающиеся на исторические данные. Особенности рассматриваемой модели являются необязательная типизация и отсутствие необходимости задания строгой схемы данных, что позволяет модифицировать и добавлять атрибуты как в информацию о пациенте, так и в используемые протоколы обследований без необходимости введения новых абстракций и выполнения миграций схем данных. Это очень удобно при работе со слабоструктурированными данными, получаемыми с помощью предложенного механизма формальных проекций с различных видов диагностического обследования.

Список использованных источников

1. Abu-Nasser, B. S. Medical expert system survey / B. S. Abu-Nasser // Intern. J. of Engineering and Information Systems (IJEAIS). – 2017. – Vol. 1, iss. 7. – P. 218–224.
2. Jain, L. C. Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine / L. C. Jain, A. Kandel, H. N. L. Teodorescu. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 393 p.
3. Sadalage, P. J. NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence / P. J. Sadalage, M. Fowler. – Hoboken : Addison-Wesley Professional, 2012. – 192 p.
4. Robinson, I. Graph Databases: New Opportunities for Connected Data / I. Robinson, J. Webber, E. Eifrem. – 2nd ed. – O'Reilly Media, 2015. – 238 p.
5. Роль искусственных нейронных сетей в выявлении ранней гибели ганглионарных клеток сетчатки у пациентов с дегенеративными оптиконеуропатиями / Т. В. Качан [и др.] // Офтальмология. Восточная Европа. – Минск, 2019. – Т. 9, № 4. – С. 445–458.
6. Чернявский А. Ф. Обработка и индексирование денормализованных и слабоструктурированных данных / А. Ф. Чернявский, А. В. Курочкин, В. С. Садов // Прикладные проблемы оптики, информатики,

радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы Пятой Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2019. – С. 164–165.

7. Baton, J. *Learning Neo4j 3.x* / J. Baton, R. van Bruggen. – Birmingham : Packt, 2017. – 316 p.

References

1. Abu-Nasser B. S. Medical expert system survey. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*, 2017, vol. 1., iss. 7, pp. 218–224.

2. Jain L. C., Kandel A., Teodorescu H. N. L. *Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 393 p.

3. Sadalage P. J., Fowler M. *NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence*. Hoboken, Addison-Wesley Professional, 2012, 192 p.

4. Robinson I., Webber J., Eifrem E. *Graph Databases: New Opportunities for Connected Data*. O'Reilly Media, 2015, 238 p.

5. Kachan, T., Kurachkin A., Halavataya K., Marchanka L, Fedulau A., ..., Mushtina T. Rol' iskusstvennykh nejronnykh setej v vyjavlenii rannej gibeli ganglionarnykh kletok setchatki u pacientov s degenerativnymi optiko-nejropatijami [The role of artificial neural networks in detecting early death of retinal ganglion cells in patients with degenerative optoneuropathies]. *Oftalmologia. Vostochnaya Evropa [Ophthalmology. Eastern Europe]*. Minsk, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 445–458 (in Russian).

6. Chernyavsky A. F., Kurachkin A. V., Sadau V. S. Obrabotka i indeksirovanie denormalizovannykh i slabostrukturirovannykh dannykh [Processing and indexing of denormalized and loosely structured data]. *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostojaniya: materialy Pjatoj Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Proceedings of the 5th International Conference "Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics and Condensed Matter Physics"]*. Minsk, 2019, pp. 164–165 (in Russian).

7. Baton J., Bruggen van R. *Learning Neo4j 3.x*. Birmingham, Packt, 2017, 316 p.

Информация об авторах

Курочкин Александр Васильевич, аспирант, старший преподаватель кафедры интеллектуальных систем, факультет радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

E-mail: alex.v.kurochkin@gmail.com

Садов Василий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры интеллектуальных систем, факультет радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

E-mail: sadov@bsu.by

Information about the authors

Aliaksandr V. Kurachkin, Postgraduate student, Senior Lecturer, Department of Intelligent Systems, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Belarus.

E-mail: alex.v.kurochkin@gmail.com

Vasili S. Sadau, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Intelligent Systems, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Belarus.

E-mail: sadov@bsu.by