Ι/ΙΤΜΟ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ май-июнь 2025 Том 25 № 3 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS May–June 2025 Vol. 25 № 3 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-565-573 УДК 004.95

Модель хранения пространственных данных тензорных геофизических полей Гульнара Равилевна Воробьева¹[∞], Андрей Владимирович Воробьев², Глеб Олегович Орлов³

1,2,3 Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация

² Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Российская Федерация

¹ Gulnara.vorobeva@gmail.com[⊠], https://orcid.org/0000-0001-7878-9724

² geomagnet@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609

³ orlovgleb99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-5123-3859

Аннотация

Введение. Известно, что геофизические поля (геомагнитное, гравитационное и электромагнитное) при их регистрации или моделировании представляют совокупность нескольких векторных составляющих, характеризующих изменение соответствующих параметров в пространстве и во времени. Хранение данных геофизических полей в настоящее время реализуется на основе известных моделей данных, представляющих собой, как правило, реляционную структуру. Анализ известных исследований показал избыточность и неэффективность такого подхода. Это выражается в низкой скорости получения искомых данных при использовании комплексных мультипредикатных запросов. Непрерывно растущие объем и сложность рассматриваемых данных требуют новых подходов к организации их хранения для повышения производительности информационных систем, применяемых для поддержки принятия решений на основе данных геофизических полей. Метод. В данной работе предлагается и исследуется модель представления и хранения данных геофизических полей, обеспечивающая повышение производительности информационных систем. Представлен анализ специфических особенностей геофизических полей, обусловленных их тензорным характером. Рассмотрены основные компоненты данных, определены перспективные варианты комбинирования известных моделей данных для получения наилучшего результата для повышения производительности соответствующих баз данных. Основные результаты. Предложена мультиосевая модель данных геофизических полей, учитывающая тензорную многокомпонентную структуру полей и сочетающая особенности иерархической организации данных и элементоцентричной разметки информации. Отличительной особенностью предложенной модели является введение статичной и динамической осей. Такой подход обеспечивает представления метаданных, оперативных и архивных данных, взаимодействие между ними на уровне фоновых процессов с участием программных триггеров с темпоральными предикатами. Обсуждение. На примере данных геомагнитного поля и его вариаций продемонстрировано увеличение скорости выполнения одно- и мультипредикатных запросов на выборку данных, вставку новых записей в хранилище. Вычислительные эксперименты по сравнению предлагаемого и известных подходов к организации и хранению данных геофизических полей на различных наборах и объемах данных показали, что реализация мультиосевой модели данных дает возможность повысить скорость выполнения однопредикативных запросов на 25,7 %, мультипредикативных запросов на 20,1 %, запросов на вставку новых записей на 21,3 %. Это позволяет сделать вывод о целесообразности применения предложенного решения.

Ключевые слова

данные геофизических полей, модель данных, иерархическая модель данных, тензорное исчисление, геопространственные данные

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-30010-П).

Ссылка для цитирования: Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Орлов Г.О. Модель хранения пространственных данных тензорных геофизических полей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 3. С. 565–573. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-565-573

[©] Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Орлов Г.О., 2025

Model for storing spatial data of tensor geophysical fields

Gulnara R. Vorobeva^{1⊠}, Andrei V. Vorobev², Gleb O. Orlov³

1,2,3 Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation

² Geophysical Center of the RAS, Moscow, 119296, Russian Federation

¹ gulnara.vorobeva@gmail.com[⊠], https://orcid.org/0000-0001-7878-9724

² geomagnet@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609

³ orlovgleb99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-5123-3859

Abstract

It is known that geophysical fields (geomagnetic, gravitational and electromagnetic), when recorded or modeled, represent a set of several vector components characterizing the change in the corresponding parameters in space and time. Geophysical field data is currently stored based on known data models which usually have a relational structure. Analysis of known studies has shown the redundancy and inefficiency of this approach. This is reflected in the low speed of obtaining the desired data when using complex multi-predicate queries. The continuously growing volume and complexity of the data under consideration require new approaches to organizing their storage to improve the performance of information systems used to support decision-making based on geophysical field data. This paper proposes and examines a model for representing and storing geophysical field data that ensures increased performance of information systems. An analysis of specific features of geophysical fields due to their tensor nature is presented. The main data components are considered, promising options for combining known data models are determined to obtain the best result to improve the performance of the corresponding databases. A multi-axis model of geophysical field data is proposed that takes into account the tensor multi-component structure of the fields and combines the features of the hierarchical organization of data and element-centric information markup. A distinctive feature of the proposed model is the introduction of static and dynamic axes. This approach ensures the presentation of metadata, operational and archived data, and the interaction between them at the level of background processes with the participation of software triggers with temporal predicates. Using the example of geomagnetic field data and its variations, an increase in the speed of executing single- and multi-predicate queries for data selection and insertion of new records into the storage is demonstrated. Computational experiments comparing the proposed and known approaches to the organization and storage of geophysical field data on various sets and volumes of data showed that the implementation of the multiaxis data model allows increasing the speed of executing single-predicate queries by 25.7 %, multi-predicate queries by 20.1 %, and queries for inserting new records by 21.3 %. This allows us to conclude that the proposed solution is appropriate.

Keywords

geophysical field data, data model, hierarchical data model, tensor calculus, geospatial data

Acknowledgements

This work was funded by the Russian Science Foundation (project No. 21-77-30010-P).

For citation: Vorobeva G.R., Vorobev A.V., Orlov G.O. Model for storing spatial data of tensor geophysical fields. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 565–573 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-565-573

Введение

В настоящее время результаты регистрации и моделирования параметров геофизических полей являются важным источником информации о сложных процессах, протекающих в недрах Земли, на ее поверхности и в околоземном пространстве. Такая информация используется как при решении научных задач (например, при исследовании сопутствующих процессов естественной и техногенной природы происхождения), так и для поддержки принятия решений в узкопрофильных прикладных областях (в тех случаях, когда воздействие геофизических полей значимо для функционирования объектов и систем техносферы).

Доступ к обозначенным данным, как правило, реализуется силами соответствующих владельцев геофизической информации, в качестве которых выступают различной ведомственной принадлежности научные организации и учреждения, располагающие необходимым для регистрации искомых параметров полей информационно-измерительным оборудованием. Так, к примеру, регистрация параметров геомагнитного поля на протяжении многих десятилетий осуществляется магнитными обсерваториями и вариационными станциями, распределенными по всей земной поверхности (хотя и неравномерно) [1, 2]. Для предоставления потребителям возможности получения данных используются специализированные веб-ресурсы, которые в соответствии с предопределенными протоколами доступа предоставляют по параметризованным (в основном) запросам искомые геофизические данные.

Отметим, что не всегда искомые данные являются результатом регистрации и наблюдения параметров реально протекающих геофизических процессов. В некоторых случаях требуется моделирование «идеального» геофизического поля в соответствующей геопространственной локации, что необходимо, в частности, для сопоставления полученных значений с зарегистрированными и оценки имеющего при этом места отклонения, что также служит важным источником информации при решении прикладных и/или научно-исследовательских задач. Например, параметры вектора главного (невозмущенного) геомагнитного поля могут быть рассчитаны с использованием различным моделей: WMM [3], IGRF [1, 4] и др.

Сложная организация геофизических данных и их значительный объем накладывают определенные ограничения на формат их представления таким образом, чтобы не терять важной информации о поле, с одной стороны, и обеспечить высокую вычислительную скорость выполнения запросов к соответствующему хранилищу данных, с другой. В этой связи и с учетом известных форматов представления данных необходимо разработать модель представления данных геофизических полей, учитывающую их тензорный характер и обеспечивающую при программной реализации высокую производительность выполнения запросов к ним в условиях необходимости оперативного принятия решений на их основе (в том числе, в критических ситуациях, связанных, например, с вопросами обеспечения техносферной безопасности).

Характеристика исходных данных

Параметры геофизических полей, регистрируемые с заданным шагом дискретизации различными информационно-измерительными устройствами, аккумулируются в наборы геофизических данных, предоставляемых по запросу потребителям соответствующими поставщиками информации. Здесь и далее в качестве примера рассматриваются параметры геомагнитного поля и его вариаций, регистрируемые наземными магнитными обсерваториями и вариационными станциями международного проекта SuperMAG [5, 6].

Отличительной особенностью рассматриваемых полей является их тензорный характер, который в упрощенном виде может быть описан некоторой исходной (чаще пространственной) точкой с исходящими из нее векторами, в свою очередь, задающими определенные атрибутивные параметры рассматриваемого процесса. Фактически тензорное поле при этом представляет собой задаваемую функцией поверхность, каждой точке которой ставится в соответствие тензор, привязанный к соответствующей системе координат и имеющий начало в заданной пространственной точке [7–10].

Количество исходящих векторов определяет ранг тензора [11]. Данные о состоянии электромагнитного поля Земли в каждой точке трехмерного пространства в системе координат, связанной с центром масс Земли, представляют собой прямое произведение тензора электромагнитного поля на радиус-вектор исследуемой точки. В связи с этим геопространственные данные о состоянии магнитного поля Земли представляют собой прямое произведение тензора второго порядка на тензор первого порядка, т. е. описываются при помощи тензора третьего порядка [12].

Визуализация рассматриваемого тензора (тензорного поля), как правило, выполняется посредством декомпозиции его векторов на скалярные величины, каждой из которых ставится в соответствие свой графический примитив. Так, например, в случае использования комплекса геоинформационных средств и технологий для визуализации геомагнитного поля в качестве геопространственных примитивов, применяют пространственные точки с соответствующими атрибутивными значениями. Множество формируемых таким образом геопространственных точек формируют в своей совокупности геопространственный слой, который в дальнейшем визуализируется на некоторой картографической подложке [2, 4]. Возможна одновременная визуализация многих накладываемых друг на друга слоев, имитирующих различные вектора тензора геомагнитного поля, что в подавляющем большинстве случаев приводит к повышению сложности визуального восприятия итогового геопространственного изображения, а также накладывает определенные ограничения на совместное использование для рассматриваемых данных геоинформационных инструментов.

Целесообразно учитывать специфику представления данных тензорных полей, чтобы для оптимизации хранения и вариативности представления искомых параметров поля применять и осевую структуру соответствующего тензора, который для совокупности пространственных точек также демонстрирует картину пространственно-временного распределения соответствующих параметров.

Мультиосевая модель хранения данных тензорных полей

Применим комплексную структуру параметров тензорного поля в качестве основы для создания модели представления и хранения соответствующих данных. В этой связи предлагается структура, условно названная мультитосевой. Центральным ее элементом является источник геопространственной/геофизической информации, для которого осуществляется хранение регистрируемой информации. При этом в качестве обозначенного центрального компонента мультиосевой модели может выступать как источник, обеспечивающий регистрацию искомых параметров в режиме реального или квазиреального времени, так и некоторая цифровая модель, выполняющая расчет тех же атрибутивных параметров. Например, в случае геомагнитных данных, в качестве центрального элемента модели может выступать магнитная обсерватория/вариационная станция, в режиме реального времени осуществляющая регистрацию параметров магнитного поля Земли и его вариаций. С другой стороны, в случае физического отсутствия магнитометра в той или иной пространственной точке, в качестве рассматриваемого компонента модели данных выступает некоторая модель или цифровой двойник магнитной обсерватории/вариационной станции, моделирующей расчет аналогичных параметров в рассматриваемой пространственной точке.

Для каждого центрального звена модели данных поля формируются три оси данных, представляющие собой независимые пары вида «атрибут–значение».

Количество пар данных при этом неограничено. С учетом специфики данных рассматриваемых тензорных полей предлагается введение трех основных осей, логически связанных с обозначенным центральным элементом/звеном модели данных (рис. 1):

 - статичная ось метаданных, предназначенная для хранения информации об источнике данных поля. Предположим, если рассматривается мультиосевая модель геомагнитных данных, в которой в качестве центрального элемента выступает магнитная обсерватория/вариационная станция, то на оси метаданных размещается информация: название обсерватории, ее географические координаты, ведомственная принадлежность, используемое оборудование, шаг дискретизации, единицы измерения, принятые допущения и пр.;

- динамическая ось оперативных данных, обеспечивающая структуру для хранения данных, актуальных на текущий момент времени в соответствии с шагом дискретизации источника, который определен на статичной оси метаданных. Для текущего момента времени результаты регистрации или расчета параметров геофизического поля декомпозируются на отдельные независимые пары вида «атрибут-значение». При этом значение атрибута может отсутствовать (если по тем или иным причинам регистрация или расчет соответствующего параметра поля оказались невозможны). Параметры, характеризующие текущий момент времени, для которого определены соответствующие атрибуты с их значениями, задаются в узле типа «Временная метка», который является родительским для всех узлов, представляющих атрибуты поля и их значения;
- статичная ось архивных данных, предназначенная для создания структуры хранения данных в моменты времени, следующие за текущим. По истечении заданного в метаданных шага дискретизации ветка динамической оси оперативных данных перемещается в статичную ось архивных данных, становясь уже новой веткой последней. Таким образом, на оси архивных данных размещается множество последо-



Рис. 1. Обобщенная схема мультиосевой модели хранения данных тензорных геофизических полей: *L* — количество атрибутов-метаданных; *L*₁, ..., *L*_k — значения каждого из *k* атрибутов *L*-й оси метаданных; *N* — количество атрибутов поля; *M* — количество зарегистрированных моментов времени для параметров поля

Fig. 1. Generalized scheme of a multilevel model for storing data of tensor geophysical fields: L — number of metadata attributes; L_1, \ldots, L_k — values of each of the *k* attributes of the *L*-th metadata axis; *N* — number of field attributes;

M — number of registered time points for field parameters

вательных узлов вида «Временная метка», каждый из которых содержит свою ветку дочерних узлов с соответствующими параметрами поля и их значениями.

При этом отметим, что предлагаемая структура предполагает атомарную структуру значения атрибута. В случае комплексного параметра, предполагающего множество значений, необходима декомпозиция атрибута на отдельные составляющие с атомарными значениями.

Статичная и динамическая оси данных предполагают формирование вложенной иерархии в соответствии с рангом геофизическим полем, значения параметров которого необходимо представить. Каждому параметру ставится в соответствие отдельная ось данных, являющаяся дочерней по отношению к родительской оси, в качестве которой выступает непосредственно ось, соответствующая временной метке. Так, в частности, разложение тензора третьего порядка на пары «атрибут-значение» происходит следующим образом. Пусть тензор третьего порядка представляет собой множество данных, где каждый элемент определяется тремя индексами. Например, для геомагнитного поля могут быть использованы компоненты поля по трем осям (X, Y, Z), временные производные этих компонент или взаимные корреляции между ними (рис. 2). Для формирования предлагаемой структуры для каждого момента времени создается узел вида «Временная метка», который служит родительским элементом. Далее каждый компонент тензора становится отдельным атрибутом, а значение компонента становится значением атрибута. Выделенные атрибуты группируются под родительским узлом «Временная метка». При этом в контексте геомагнитного поля отметим, что:

- каждый атрибут имеет четкое физическое или математическое значение;
- значения могут быть как числовыми, так и отсутствовать (null);
- структура остается неизменной для каждого момента времени.

Все атрибуты привязаны к конкретной временной метке. После завершения текущего момента времени вся ветка с атрибутами перемещается в статичную ось архивных данных, где становится одним из множества исторических узлов.

Данные статичной оси не меняются или меняются крайне редко. В связи с этим физическое представление

Временная метка (2025-03-17	16:24:42)
— X_component: 25672 нТл	
— Y_component: 12345 нТл	
— Z_component: -4321 нТл	
— dX/dt: 0.5 нТл/с	
— dY/dt: -0.3 нТл/с	
— dZ/dt: 0.1 нТл/с	
— X_Y_correlation: 0.75	
- X_Z_correlation: -0.2	
- Y_Z_correlation: 0.6	

Рис. 2. Пример структуры данных геомагнитного поля для заданного момента времени

Fig. 2. An example of the data structure for a geomagnetic field at a given moment in time

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 3 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 3

этих данных должно быть организовано таким образом, чтобы максимальная вычислительная скорость достигалась при извлечении данных в большей степени, чем при внесении новых или редактировании уже внесенных значений параметров метаданных.

В противоположность статичной динамическая ось подразумевает оперативное изменение и/или добавление хранимых данных. При регистрации/расчете искомых атрибутивных значений они должны с минимальной задержкой быть представлены на динамической оси таким образом, чтобы участвовать в дальнейшем в оперативном принятии решений на этой основе. Соответственно, физическая реализация рассматриваемой оси предполагает необходимость обеспечения максимально возможной вычислительной скорости на добавление и непосредственно извлечение искомых значений атрибутивных параметров.

Рассмотрим структуру связей между узлами и их привязку к осям на примере данных геомагнитного поля, для некоторого момента времени (рис. 3). Здесь центральный элемент является корневым узлом, от которого берут начало три основные оси: статичная ось метаданных (не меняется во времени, отражает постоянную информацию об источнике данных, технические характеристики оборудования, параметры сбора данных); динамическая ось оперативных данных (отражает текущие измерения; для текущего момента имеет корневой узел вида «Временная метка», от него отходят узлы с параметрами поля; ось обновляется в соответствии с шагом дискретизации); статичная ось архивных данных (отражает исторические данные; содержит некоторую последовательность узлов вида «Временная метка» по аналогии с динамической осью, однако добавление данных осуществляется по мере истечения текущего периода).

rap	oh TD
	А[Центральный элемент]> В[Статичная ось метаданных
	А> С[Динамическая ось оперативных данных]
	А> D[Статичная ось архивных данных]
	В> ВІ[пазвание оосерватории]
	в> вистерафические координаты
	В> ВЗ[Ведомственная принадлежность]
	В> B4[Используемое оборудование]
	В> B5[Шаг дискретизации]
	В> Вб[Единицы измерения]
	С> С1["Временная метка (текущая)"]
	C1> C2[X_component: 25672 нТл]
	C1> C3[Y_component: 12345 нТл]
	C1> C4[Z component: -4321 нТл]
	C1> C5[dX/dt: 0.5 нТл/c]
	D> D1["Временная метка (t-1)"]
	D1> D2[X component: 25668 HT]
	$D1 \longrightarrow D3[Y component: 12342 \exists Ta]$
	$D1 \rightarrow D4[7 component: -4323 uTa]$
	D> DS[DPEMEHHAN MEIKA (L-2/]
	US> DG[X_component: 256/0 HIJ]

Рис. 3. Пример распределения данных геомагнитного поля по статичной и динамической осям данных и оси метаданных (в общем виде)

Fig. 3. An example of the distribution of geomagnetic field data along the static and dynamic data axes and the metadata axis (in general)

В рамках предлагаемой модели предполагается взаимодействие между статичной осью архивных данных и динамической осью оперативных данных, организованное таким образом, что данные последней перемещаются в рассматриваемую ось по умолчанию без каких-либо изменений (рис. 4). При этом при необходимости возможно введение дополнительного узла в рассматриваемую модель, обеспечивающую обработку и трансформацию данных динамической оси в данные статичной.

Перемещение узла динамической оси в статичную осуществляется в автоматическом режиме с использованием специализированного триггерного механизма. Последний является параметризированным и настраиваемым, поскольку в своем функционировании опирается на значение шага дискретизации, который, в свою очередь, должен быть либо задан на статичной оси метаданных соответствующего узла, либо определен программными настройками триггера, определяющими «время жизни» узла динамической оси оперативных данных. Отметим, что в каждый момент времени при этом на динамической оси оперативных данных возможно присутствие одного и только одного узла с



Рис. 4. Схема взаимодействия между статичной и динамической осями модели данных: *T_i* — *i*-й момент времени; *k* — порядковый номер момента времени; Δ*T* — временной интервал; ID — идентификатор узла

Fig. 4. Diagram of interaction between static and dynamic axes of the data model: $T_i - i$ -th moment in time; k - serial number of the moment in time; ΔT - time interval; ID - node identifier

заданной временной меткой. При этом на статичной оси архивных данных количество узлов не ограничено ни верхней, ни нижней планкой. Единственное условие, которое обязательно должно быть соблюдено при реализации модели данных, заключается в том, чтобы обеспечить отсутствие дубликатов узлов с одноименными временными метками на одной статичной оси для заданного экземпляра центрального элемента соответствующей модели.

Рассмотрим функционирование параметризированного триггерного механизма на примере системы мониторинга геомагнитного поля с шагом дискретизации 1 ч. В начальный момент времени $t_0 = 14:00 \text{ фор-}$ мируется базовая конфигурация системы, включающая центральный элемент, связанный с метаданными и динамической осью, содержащей, в свою очередь, узел с временной меткой t₀ с компонентами геомагнитного поля (X, Y, Z). В общем виде триггерный механизм базируется на некоторой функции текущего времени T(t), в которой временной параметр определяется шагом дискретизации Δt , т. е. для *n*-го шага имеет место соотношение вида: $t_n = t_0 + n\Delta t$. Активация триггерного механизма происходит при достижении условия $T(t) = t_n$. В продолжение примера в момент времени $t_1 = 15:00$ происходит последовательная активация триггерного механизма, включающая проверку условия $t_1 = t_0 + \Delta t$, архивацию узла с меткой t_0 в статичную ось и создание нового узла t₁ в динамической оси. После срабатывания триггера структура данных трансформируется, образуя иерархическую систему, где центральный элемент связан как с динамической осью, содержащей актуальный узел t₁, так и со статичной осью, включающей архивный узел t₀. При последующем достижении момента времени $t_2 = 16:00$ процесс повторяется, что приводит к дальнейшему расширению статичной оси за счет добавления узла t₁ и обновлению динамической оси новым узлом *t*₂.

Статичная ось метаданных предназначена для представления основных данных об источнике и меняется крайне редко. Отметим, что данные статичной оси метаданных являются основным источником геопространственной информации, характеризующей соответствующую геопространственную привязку источника (в виде пары географических координат — широты и долготы) или параметров поля (значения параметров поля обязательно должны рассматриваться в контексте соответствующей геопространственной точки или области).

Таким образом, функционирование системы обеспечивает детерминированное перемещение данных между осями, поддержание целостности временных рядов, автоматическое масштабирование хранения информации при сохранении геопространственной привязки и обеспечении уникальности временных меток.

Особенности программной реализации мультиосевой модели данных

В настоящее время данные геофизических полей традиционно представлены в хранилищах, имеющих реляционную структуру [13–15]. Вместе с тем тензорный характер данных, а также практически статичный

набор метаданных предполагают необходимость введения иного преставления информации, учитывающего перечисленные особенности. Применение реляционной структуры представляет избыточные метаданные соответствующих таблиц и связей между ними, что увеличивает расходы дискового пространства. Кроме того, искомая информация распределена по многим нормализованным таблицам соответствующей реляционной базы, что в общем случае приводит к значительному увеличению сложности запросов, поскольку данные необходимо собрать из множества разных таблиц. При этом необходимые для выполнения запросов операции соединения таблиц требуют больших затрат вычислительных ресурсов, что в целом также может негативно сказаться на производительности.

Представляется целесообразным для реализации предложенной модели использовать формат, учитывающий древовидную структуру данных, а также геопространственную и временную привязки рассматриваемых при этом параметров поля. В настоящей работе для представления и обработки различных данных из прикладных областей был выбран формат XML (eXtensible Markup Language, расширяемый язык разметки) [16–18].

Каждый источник данных с уникальным (в том числе суррогатным идентификатором), либо геопространственная привязка (также для удобства сопровождаемая некоторым идентификатором) является корнем соответствующего дерева, а оси метаданных и данных (статичная и динамическая) — дочерними узлами. Все пары данных и метаданных формата «атрибут–значение» являются соседними между собой и относятся к одному и тому же родительскому узлу первого уровня, соответствующему статичной или динамической оси данных или метаданных соответственно.

Для формализации структуры соответствующего XML-документа выполнено ее описание в виде XMLсхемы формата XSD [19]. Применение данной схемы позволило контролировать процесс формирования документа таким образом, чтобы не допустить внесения избыточных изменений в итоговую структуру, и не изменить элементоцентричную архитектуру документа. Проверка документа на валидность (соответствие XSD-схеме) должна выполняться каждый раз при формировании новой структуры (появлении нового источника, регистрации новых данных, изменении узлов статичной оси архивных данных и пр.).

Запрос к данным полей по пространственно-временным параметрам предполагает перемещение поискового курсора по осям соответствующей модели данных. С учетом XML-структуры документа, реализующего рассматриваемую модель применительно к геофизическим полям, запросы целесообразно реализовывать в виде конструкций на основе спецификаций XPath [20, 21], учитывающих древовидную организацию данных в XML-документе и соответствующей модели.

Оценка эффективности предложенного решения

Оценка эффективности предложенного решения по организации хранения данных геофизических полей

на основе мультиосевой модели была выполнена посредством сравнения выделенных метрик качества с иными практикуемыми в настоящее время подходами к хранению аналогичных данных. Для проведения вычислительных экспериментов был сформирован набор геомагнитных данных, зарегистрированных с шагом дискретизации в 1 с магнитными обсерваториями и вариационными станциями проекта SuperMAG, насчитывающем в общей сложности более 350 источников данных.

Для сравнительной оценки в качестве основных метрик качества были определены скорость получения данных из хранилища по одному и нескольким пространственно-временным параметрам (предикатам) соответственно (однопредикативные и мультипредикативные запросы), а также скорость внесения новых геомагнитных данных в те же хранилища. Вычислительные эксперименты выполнялись на примере предложенного решения, а также реляционного представления геомагнитных данных (совокупности связанных таблиц, построенных с использованием системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL) и представления данных в виде совокупности текстовых CSV-файлов, доступ к которым предоставляется посредством специализированного прикладного программного интерфейса (Application programming interface, API) (сервис проекта SuperMAG для языка программирования Python). Мультиосевая модель данных геофизических полей была реализована в XMLформате под управлением СУБД Sedna [22, 23].

Для проведения вычислительных экспериментов был разработан исследовательский прототип веб-ориентированного приложения, обеспечивающего внесение геомагнитных данных в хранилище заданного типа и извлечение данных по заданным параметрам. Поскольку задача визуализации данных при этом не рассматривалась, результат выполнения запросов был представлен простым вариантом загрузки сформированного файла KML/KMZ [24, 25] на клиентской стороне. Исследования проводились на клиентской стороне

Литература

- Reay S.J., Herzog D.C., Alex S., Kharin E.P., McLean S., Nosé M., Sergeyeva N.A. Magnetic observatory data and metadata: types and availability // Geomagnetic Observations and Models. 2011. V. 5. P. 149–181. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9858-0
- St-Louis B. Intermagnet Technical Reference Manual. Version 4.6. Edinburgh: INTERMAGNET, BGS, 2012. 100 p.
- Califf S., Alken P., Chulliat A., Anderson B., Rock K., Vines S., Barnes R., Liou K. Investigation of geomagnetic reference models based on the Iridium® constellation // Earth, Planets and Space. 2022. V. 74. N 1. P. 37. https://doi.org/10.1186/s40623-022-01574-w
- Lazzeri C., Samsonov A., Forsyth C., Branduardi-Raymont G., Bogdanova Y. A statistical study of the properties of, and geomagnetic responses to, large, rapid southward turnings of the interplanetary magnetic field // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2024. V. 129. N 9. P. e2023JA032160. https://doi. org/10.1029/2023JA032160
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2012. V. 117. N 9. P. A09213. https://doi.org/10.1029/2012JA017683
- Janzhura A.S., Troshichev O.A. Determination of the running quiet daily geomagnetic variation // Journal of Atmospheric and Solar-

с применением персонального компьютера (CPU Intel Core i5 10300Н ГГц, оперативная память 4 ГБ, скорость интернет-соединения ~52,4 Мбит/с и на серверной стороне – на базе веб-сервера с процессором 72* Intel(R) Xeon(R) Gold 6140 CPU @ 2.30GHz).

В результате проведения вычислительных экспериментов на различных наборах и объемах данных геофизических полей было установлено, что применение мультиосевой модели данных для хранения рассматриваемых данных позволит повысить скорость выполнения однопредикативных запросов на 25,7 %, мультипредикативных запросов на 20,1 %, запросов на вставку новых записей в среднем на 21,3 %, что подтверждает целесообразность реализации предложенного решения.

Заключение

Данные геофизических полей в настоящее время являются основным источником информации о сложных процессах, протекающих на земной поверхности и за ее пределами, а также широко используются в задачах информационной поддержки принятия решений. В этой связи актуальна задача совершенствования известных подходов к организации и хранению данных геофизических полей таким образом, чтобы обеспечить повышение производительности различных запросов к соответствующим базам данных.

В работе предложена мультиосевая модель данных геофизических полей, основанная на иерархических структурах данных и элементоцентричной разметке информации, отличающаяся тем, что в соответствии с тензорной многокомпонентной структурой полей вводятся статичная и динамическая оси, которые берут начало в центральном узле, соответствующем источнику данных, и предназначены для представления метаданных, оперативных и архивных данных, взаимодействие между которыми осуществляется на уровне фоновых процессов с участием программных триггеров с темпоральными предикатами.

References

- Reay S.J., Herzog D.C., Alex S., Kharin E.P., McLean S., Nosé M., Sergeyeva N.A. Magnetic observatory data and metadata: types and availability. *Geomagnetic Observations and Models*, 2011, vol. 5, pp. 149–181. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9858-0_7
- St-Louis B. Intermagnet Technical Reference Manual. Version 4.6. Edinburgh: INTERMAGNET, BGS, 2012, 100 p.
- Califf S., Alken P., Chulliat A., Anderson B., Rock K., Vines S., Barnes R., Liou K. Investigation of geomagnetic reference models based on the Iridium® constellation. *Earth, Planets and Space*, 2022, vol. 74, no. 1, pp. 37. https://doi.org/10.1186/s40623-022-01574-w
- Lazzeri C., Samsonov A., Forsyth C., Branduardi-Raymont G., Bogdanova Y. A statistical study of the properties of, and geomagnetic responses to, large, rapid southward turnings of the interplanetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, vol. 129, no. 9, pp. e2023JA032160. https://doi. org/10.1029/2023JA032160
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, vol. 117, no. 9, pp. A09213. https://doi.org/10.1029/2012JA017683
- 6. Janzhura A.S., Troshichev O.A. Determination of the running quiet daily geomagnetic variation. *Journal of Atmospheric and Solar*-

Terrestrial Physics. 2008. V. 70. N 7. P. 962–972. https://doi. org/10.1016/j.jastp.2007.11.004

- Peng Z., Laramee S. Higher dimensional vector field visualization. a survey // Proc. of the Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG '09). 2009. P. 149–163.
- Hergl C., Blecha C., Kretzschmar V., Raith F., Gunther F., Stommel M., Jankowai J., Hotz I., Nagel T., Scheuermann G. Visualization of tensor fields in mechanics // Computer Graphics Forum. 2021. V. 40. N 6. P. 135–161. https://doi.org/10.1111/ cgf.14209
- Jilesh V., Pournami A. On a generalization of Laplace distribution with applications // International Journal of Data Science and Analytics. 2025. in press. https://doi.org/10.1007/s41060-024-00706-7
- He Z., Hu X., Teng Y., Zhang X., Shen X. Data agreement analysis and correction of comparative geomagnetic vector observations // Earth, Planets and Space. 2022. V. 74. N 1. P. 29. https://doi. org/10.1186/s40623-022-01583-9
- Huang Y., Wu L., Li D. Theoretical research on full attitude determination using geomagnetic gradient tensor // The Journal of Navigation. 2015. V. 68. N 5. P. 951–961. https://doi.org/10.1017/ S0373463315000259
- Oliva P., Xu C. On the Herbrand functional interpretation // Mathematical Logic Quarterly. 2020. V. 66. N 1. P. 91–98. https://doi. org/10.1002/malq.201900067
- Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Индуктивный метод восстановления временных рядов геомагнитных данных // Труды СПИИРАН. 2018. № 2(57). С. 104–133. https://doi.org/10.15622/sp.57.5
- 14. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Оценка влияния геомагнитной активности на метрологические характеристики инклинометрических информационно-измерительных систем // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 21–24.
- Воробьев А.В., Воробьева Г.Р., Юсупова Н.И. Концепция единого пространства геомагнитных данных // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 2. С. 390–415. https://doi.org/10.15622/sp.18.2.390-415
- Muhammad A., Minhaj K. Enhancing XML data parsing and querying performance on multi-core architectures // Journal of Statistics, Computing and Interdisciplinary Research. 2024. V. 6. N 1. P. 75–89. https://doi.org/10.52700/scir.v6i1.158
- 17. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Подход к обнаружению и устранению артефактов пространственных изолиний в приложениях Веб-ГИС // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47. № 1. С. 126–136. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1127
- Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Подход к динамической визуализации разнородных геопространственных векторных изображений // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48. № 1. С. 123–138. https:// doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1279
- Shene J., Chnoor R., Mzhda A. XML schema validation using Java API for XML processing // UKH Journal of Science and Engineering. 2022. V. 6. N 1. P. 33–41. https://doi.org/10.25079/ukhjse.v6n1y2022
- Chen R., Wang Z., Su H., Xie S., Wang Z. Parallel XPath query based on cost optimization // The Journal of Supercomputing. 2022. V. 78. N 4. P. 5420–5449. https://doi.org/10.1007/s11227-021-04074-y
- Areces C., Fervari R. Axiomatizing Hybrid XPath with data // Logical Methods in Computer Science. 2021. V. 17. N 3. P. 5. https://doi. org/10.46298/lmcs-17(3:5)2021
- 22. Chernenkiy V.M., Gapanyuk Y.E., Kaganov Y.T., Dunin I.V., Lyaskovsky M.A., Larionov V.S. Storing metagraph model in relational, document-oriented, and graph databases // CEUR Workshop Proceedings. 2018. V. 2277. P. 82–89.
- Terekhov V., Gapanyuk Y., Kanev A. Metagraph representation for overcoming limitations of existing knowledge bases // Proc. of the 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). 2021. P. 458–464. https://doi.org/10.23919/fruct50888.2021.9347601
- Zichar M. Geovisualization based upon KML // Journal of Agricultural Informatics. 2012. V. 3. N 1. P. 19–26. https://doi. org/10.17700/jai.2012.3.1.49
- Ortínez-Alvarez A., Ruiz-Suárez L.G., Luis G., Ortega E., García-Reynoso A., Peralta O., López-Gaona A., Castro, T., Martínez-Arroyo A. Emission inventory point source visualization on Google Earth and integrated with HYSPLIT model // Atmósfera. 2021. V. 34. N 2. P. 143–156. https://doi.org/10.20937/ATM.52834

Terrestrial Physics, 2008, vol. 70, no. 7, pp. 962–972. https://doi. org/10.1016/j.jastp.2007.11.004

- Peng Z., Laramee S. Higher dimensional vector field visualization. a survey. Proc. of the Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG '09), 2009, pp. 149–163.
- Hergl C., Blecha C., Kretzschmar V., Raith F., Gunther F., Stommel M., Jankowai J., Hotz I., Nagel T., Scheuermann G. Visualization of tensor fields in mechanics. *Computer Graphics Forum*, 2021, vol. 40, no. 6, pp. 135–161. https://doi.org/10.1111/cgf.14209
- Jilesh V., Pournami A. On a generalization of Laplace distribution with applications. *International Journal of Data Science and Analytics*, 2025. in press. https://doi.org/10.1007/s41060-024-00706-7
- He Z., Hu X., Teng Y., Zhang X., Shen X. Data agreement analysis and correction of comparative geomagnetic vector observations. *Earth, Planets and Space*, 2022, vol. 74, no. 1, pp. 29. https://doi. org/10.1186/s40623-022-01583-9
- Huang Y., Wu L., Li D. Theoretical research on full attitude determination using geomagnetic gradient tensor. *The Journal of Navigation*, 2015, vol. 68, no. 5, pp. 951–961. https://doi. org/10.1017/S0373463315000259
- Oliva P., Xu C. On the Herbrand functional interpretation. Mathematical Logic Quarterly, 2020, vol. 66, no. 1, pp. 91–98. https://doi.org/10.1002/malq.201900067
- Vorobev, A., Vorobeva, G. Inductive method of geomagnetic data time series recovering. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 2, no. 57, pp. 104-133. (in Russian). https://doi.org/10.15622/sp.57.5
- Vorob'ev, A.V., Vorob'eva, G.R. Evaluation of the influence of geomagnetic activity on metrological characteristics of inclinometric information measuring systems. *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 546–551. https://doi.org/10.1007/s11018-017-1232-1
- Vorobev A., Vorobeva G., Yusupova N. Conception of geomagnetic data integrated space. SPIIRAS Proceedings, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 390–415. (in Russian). https://doi.org/10.15622/sp.18.2.390-415
- Muhammad A., Minhaj K. Enhancing XML data parsing and querying performance on multi-core architectures. *Journal of Statistics, Computing and Interdisciplinary Research*, 2024, vol. 6, no. 1, pp. 75–89. https://doi.org/10.52700/scir.v6i1.158
- 17. Vorobev A.V., Vorobeva G.R. An approach to detecting and eliminating spatial contour artifacts in Web GIS applications. *Computer Optics*, 2023, vol. 47, no. 1, pp. 126–136. (in Russian). https://doi.org/10.18287/2412-6179-co-1127
- Vorobev A.V., Vorobeva G.R. An approach to dynamic visualization of heterogeneous geospatial vector images. *Computer Optics*, 2024, vol. 48, no. 1, pp. 123–138. (in Russian). https://doi. org/10.18287/2412-6179-CO-1279
- Shene J., Chnoor R., Mzhda A. XML schema validation using Java API for XML processing. *UKH Journal of Science and Engineering*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 33–41. https://doi.org/10.25079/ukhjse. v6n1y2022
- Chen R., Wang Z., Su H., Xie S., Wang Z. Parallel XPath query based on cost optimization. *The Journal of Supercomputing*, 2022, vol. 78, no. 4, pp. 5420–5449. https://doi.org/10.1007/s11227-021-04074-y
- Areces C., Fervari R. Axiomatizing Hybrid XPath with data. Logical Methods in Computer Science, 2021, vol. 17, no. 3, pp. 5. https://doi. org/10.46298/lmcs-17(3:5)2021
- Chernenkiy V.M., Gapanyuk Y.E., Kaganov Y.T., Dunin I.V., Lyaskovsky M.A., Larionov V.S. Storing metagraph model in relational, document-oriented, and graph databases. *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2277, pp. 82–89.
- Terekhov V., Gapanyuk Y., Kanev A. Metagraph representation for overcoming limitations of existing knowledge bases. *Proc. of the 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2021, pp. 458–464. https://doi.org/10.23919/fruct50888.2021.9347601
- Zichar M. Geovisualization based upon KML. Journal of Agricultural Informatics, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 19–26. https://doi.org/10.17700/ jai.2012.3.1.49
- Ortínez-Alvarez A., Ruiz-Suárez L.G., Luis G., Ortega E., García-Reynoso A., Peralta O., López-Gaona A., Castro, T., Martínez-Arroyo A. Emission inventory point source visualization on Google Earth and integrated with HYSPLIT model. *Atmósfera*, 2021, vol. 34, no. 2, P. 143–156. https://doi.org/10.20937/ATM.52834

Авторы

Воробьева Гульнара Равилевна — доктор технических наук, доцент, профессор, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация, SC 57189275619, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724, Gulnara.vorobeva@gmail.com

Воробьев Андрей Владимирович — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, профессор, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Российская Федерация, вс 56767909700, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

Орлов Глеб Олегович — аспирант, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация, **sc** 58970339400, https://orcid.org/0009-0003-5123-3859, orlovgleb99@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2025 Одобрена после рецензирования 15.05.2025 Принята к печати 25.05.2025

Authors

Gulnara R. Vorobeva — D.Sc., Associate Professor, Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation, SC 57189275619, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724, gulnara. vorobeva@gmail.com

Andrei V. Vorobev — D.Sc., Associate Professor, Head of Department, Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation; Senior Researcher, Geophysical Center of the RAS, Moscow, 119296, Russian Federation, Sc 56767909700, https://orcid. org/0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

Gleb O. Orlov — PhD Student, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation, Sc 58970339400, https://orcid.org/0009-0003-5123-3859, orlovgleb99@mail.ru

Received 22.04.2025 Approved after reviewing 15.05.2025 Accepted 25.05.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial»