

Научная статья

УДК 004.95

doi: 10.17223/19988605/71/7

**Мультиосевая модель геофизических данных:
концепция, формализация, реализация****Гульнара Равилевна Воробьева¹, Андрей Владимирович Воробьев², Глеб Олегович Орлов³**^{1, 2, 3} Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия¹ Gulnara.vorobeva@gmail.com² Geomagnet@list.ru³ orlovgleb99@mail.ru

Аннотация. Известно, что геофизические поля (геомагнитное, гравитационное и электромагнитное) в контексте регистрируемых или моделируемых данных представляют собой совокупность нескольких соосных векторных составляющих, характеризующих изменение соответствующего параметра в пространстве и во времени. Практикуемые в настоящее время подходы к организации хранения таких данных базируются, как правило, на одной из моделей данных. При этом совместное хранение метаданных источника и непосредственно геофизических данных во многих случаях сопряжено с неэффективным расходом сопутствующих вычислительных ресурсов. В данной работе рассматривается подход, ориентированный на раздельное хранение, но совместное комплексное применение метаданных и данных средств регистрации геофизических полей с учетом их многовекторной природы и тензорного представления анализируемых параметров. На примере геомагнитного поля рассматривается эффективность предлагаемого подхода в контексте оптимизации хранения данных, с одной стороны, и повышения вычислительной скорости выполнения запросов к ним – с другой.

Ключевые слова: геофизические данные; тензорное поле; векторное поле; хранение данных; обработка и манипулирование прикладными данными.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00143, <https://rscf.ru/project/25-21-00143/>

Для цитирования: Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Орлов Г.О. Мультиосевая модель геофизических данных: концепция, формализация, реализация // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 71. С. 71–81. doi: 10.17223/19988605/71/7

Original article

doi: 10.17223/19988605/71/7

Multi-axis model of geophysical data: concept, formalization, implementation**Gulnara R. Vorobeva¹, Andrey V. Vorobev², Gleb O. Orlov³**^{1, 2, 3} Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation¹ Gulnara.vorobeva@gmail.com² Geomagnet@list.ru³ orlovgleb99@mail.ru

Abstract. It is known that geophysical fields (geomagnetic, gravitational and electromagnetic) in the context of recorded or modeled data are a set of several coaxial vector components characterizing the change in the corresponding parameter in space and time. Currently practiced approaches to organizing the storage of such data are based, as a rule, on one of the data models. At the same time, joint storage of source metadata and geophysical data directly in many cases is associated with inefficient use of associated computing resources. This paper considers an approach focused on separate storage, but joint complex application of metadata and data of geophysical field recording tools, taking into account their multi-vector nature and tensor representation of the analyzed parameters. Using the example of the

geomagnetic field, the effectiveness of the proposed approach is considered in the context of optimizing data storage, on the one hand, and increasing the computational speed of executing queries to them, on the other.

Keywords: geophysical data; tensor field; vector field; data storage; processing and manipulation of applied data.

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 25-21-00143, <https://rscf.ru/project/25-21-00143/>

For citation: Vorobeva, G.R., Vorobev, A.V., Orlov, G.O. (2025) Multi-axis model of geophysical data: concept, formalization, implementation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 71. pp. 71–81. doi: 10.17223/19988605/71/7

Введение

На сегодняшний день моделирование и регистрация геофизических полей оказывают большое влияние на исследование процессов, протекающих в недрах и на поверхности Земли. Данная информация используется как в научных исследованиях, так и для поддержки принятия решений в условиях доступа к данным, предоставляемым магнитными обсерваториями и вариационными станциями [1, 2]. При этом формат представления указанной информации также определяет ее владельца. Хотя в соответствующих предметных областях действуют собственные стандарты и спецификации представления геофизических данных (например, спецификация IAGA–2002 для представления данных геомагнитного поля [1]), различные поставщики данных привносят в него собственные «диалекты» (по аналогии с различными СУБД реляционного типа, практикующими различные вариации стандартизованного языка запросов SQL на своих платформах).

В некоторых ситуациях в целях оценки отклонения от нормы требуется моделирование идеального (невозмущенного) геофизического поля. Его параметры могут быть вычислены с использованием таких моделей, как IGRF [1] и WMM [3]. Формат представления результатов вычислений определяется разработчиком программных реализаций соответствующих моделей и в целом может отличаться от общепринятого в соответствующей предметной области, преследуя локальные цели решения поставленной задачи [4].

При этом представляется важным отметить, что формат представления данных должен учитывать большой и непрерывно возрастающий объем геофизической информации. Так, к примеру, магнитные обсерватории регистрируют параметры геомагнитного поля ежеминутно на протяжении многих лет, при этом количество станций только увеличивается, соответственно, и экспоненциально год за годом возрастает объем используемой потребителями геофизической информации. Проблема усложняется тензорным характером рассматриваемых полей: соответствующие векторы не являются атомарными, определяются несколькими (в том числе разнонаправленными) составляющими.

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 [5, 6]. При этом в качестве независимых элементов тензора могут быть приведены скорости изменения параметров вектора геомагнитного поля по трем направлениям в декартовой системе координат [7–9].

Соответственно, необходимо разработать такую модель хранения данных геофизических полей, которая учитывает их мультиосевую структуру анализируемых параметров с динамически меняющимися значениями в контексте относительно статичных метаданных, в совокупности характеризующих пространственное распределение заданных источников данных. Представляются целесообразными отдельные представление и хранение обозначенных данных для оперативной обработки информации о геофизических полях, в том числе в системах поддержки принятия решений на этой основе. Для оценки эффективности рассматриваемого подхода к хранению данных видится необходимым сравнить

время выполнения простых однопредикатных и сложных многопредикатных запросов к данным с иными известными моделями представления – реляционной и CSV-подобной.

1. Мультиосевая модель хранения данных тензорных полей

Для обеспечения хранения геомагнитных данных в комплексном виде предлагается так называемая мультиосевая структура. Ее центральным компонентом служит некоторый источник геомагнитных данных, для которого осуществляется хранение регистрируемой информации, например геомагнитная станция или ее цифровая модель. Каждому центральному звену многоосевой модели ставятся в соответствие три оси данных, в которых содержатся пары данных в формате «атрибут–значение», при этом количество таких пар неограниченно. Беря во внимание специфику рассматриваемого тензорного геомагнитного поля, предлагается использование следующих осей, логически взаимосвязанных с центральным звеном модели (рис. 1):

- ось метаданных (статичная) содержит основные параметры источника. Если в качестве центрального звена выступает геомагнитная станция или обсерватория, то на данной оси будет такая информация, как наименование станции, ее расположение, принадлежность к ведомству, информация о техническом оснащении, используемые единицы измерения и шаг регистрации;

- ось оперативных данных (динамическая) обеспечивает хранение информации в реальном времени с учетом шага дискретизации, определенного на оси метаданных. Для текущего момента времени результаты регистрации или расчета параметров геофизического поля декомпозируются на отдельные независимые пары вида «атрибут–значение атрибута». Данные этой оси расположены в узлах с временной меткой, каждому из которых ставятся в соответствие дочерние узлы с параметрами геомагнитного поля;

- ось архивных данных (статичная) необходима для инициализации сохранения данных. По истечении времени, заданного шагом дискретизации, ветка динамической оси должна быть перемещена в статичную ось архивных данных. При перемещении она станет новой веткой последней. В результате ось архивных данных будет включать в себя набор узлов в виде временных меток, каждой из которых соответствует дочерняя ветка узлов с атрибутивными параметрами поля.

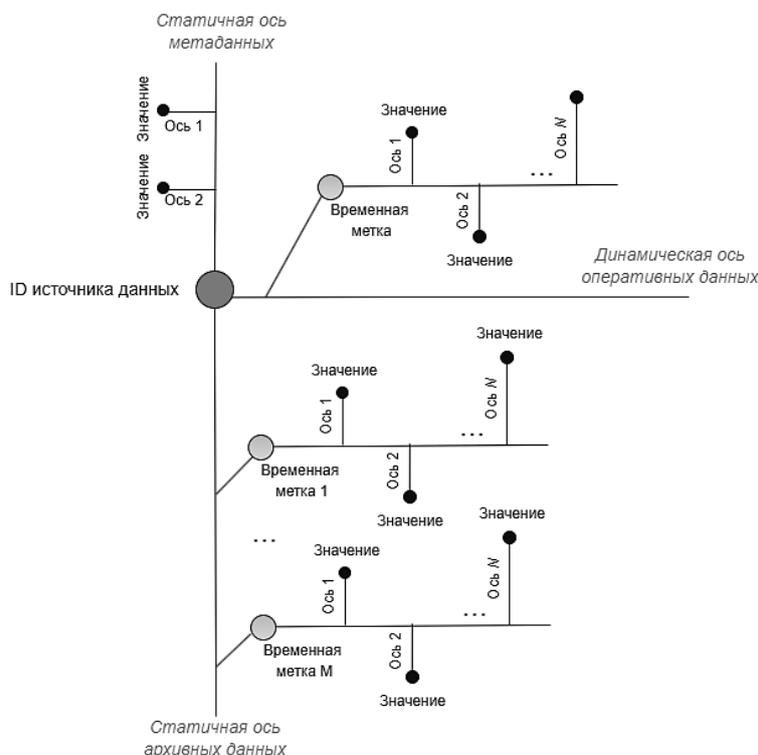


Рис. 1. Обобщенная схема мультиосевой модели хранения данных тензорных геофизических полей
 Fig. 1. Generalized scheme of the multi-axis model for storing data of tensor geophysical fields

Обмен данными между статичной и динамичной осями устроен так, что данные динамичной оси перемещаются на нее без изменений (рис. 2), при этом допускается внедрение еще одного узла, который производил бы преобразование данных динамической оси в данные статической оси.

Миграция узла в статичную ось из динамической производится при помощи специального триггера, который настраивается на определенный шаг дискретизации. Этот шаг может быть определен на статической оси. Общее количество узлов на статической оси не ограничено, в то время как на динамической оси одной временной метке может соответствовать только один узел данных.

Узел оси метаданных, соответствующий геопространственной привязке, является основным связующим звеном между экземплярами центрального элемента (компонента) соответствующей модели данных поля. Результатом обозначенной связи нескольких центральных элементов (экземпляров модели) является множество пространственных точек с атрибутивными значениями в некотором пространственно-временном интервале.

Дальнейшее связывание осуществляется по общим узлам соответствующих статичных осей архивных данных таким образом, чтобы сформировать набор геопространственных данных, характеризующих пространственно-временное изменение тех или иных параметров (или их совокупности) геофизического поля.

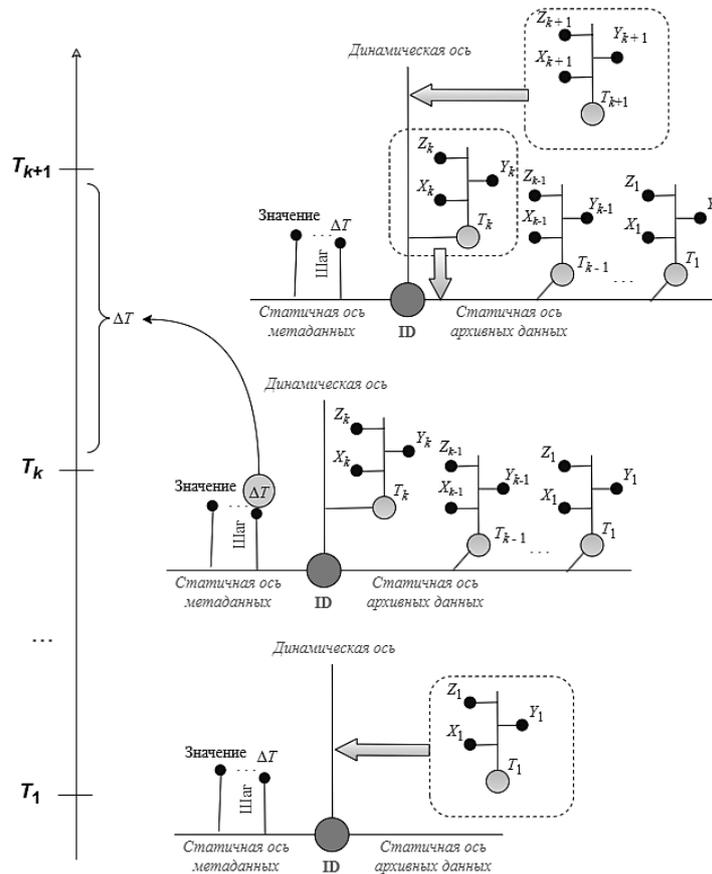


Рис. 2. Схема взаимодействия между статичной и динамической осями модели данных
 Fig. 2. Diagram of interaction between static and dynamic axes of the data model

В процессе выборки данных из одного или нескольких экземпляров мультиосевой модели данных геофизических полей выполняется их срез по пространственно-временным параметрам, указываемым в запросе на извлечение данных. При этом представляется необходимым отметить формирование новой мультиосевой структуры, центральный элемент которой определяется спецификой соответствующего запроса на выборку геофизических данных.

В простейшем случае целью запроса является получение данных от единственного источника за определенный временной период. В этом случае выполняется поиск искомого узла в хранилище,

причем в качестве параметров поиска выступают один или несколько атрибутов, представленных в статичной оси метаданных. В результате формируется новая мультиосевая структура, центр которой совпадает с соответствующим экземпляром модели, а оси совпадают только частично: статичная ось метаданных (при необходимости) копируется в новую структуру без изменений (либо не копируется вовсе, тогда результат не содержит статичную ось), динамические оси могут также отсутствовать (если не требуется получения оперативной информации о состоянии поля), статичная ось архивных данных фильтруется таким образом, что в ней остаются только те узлы, которые соответствуют указанным в параметрах запроса временным меткам.

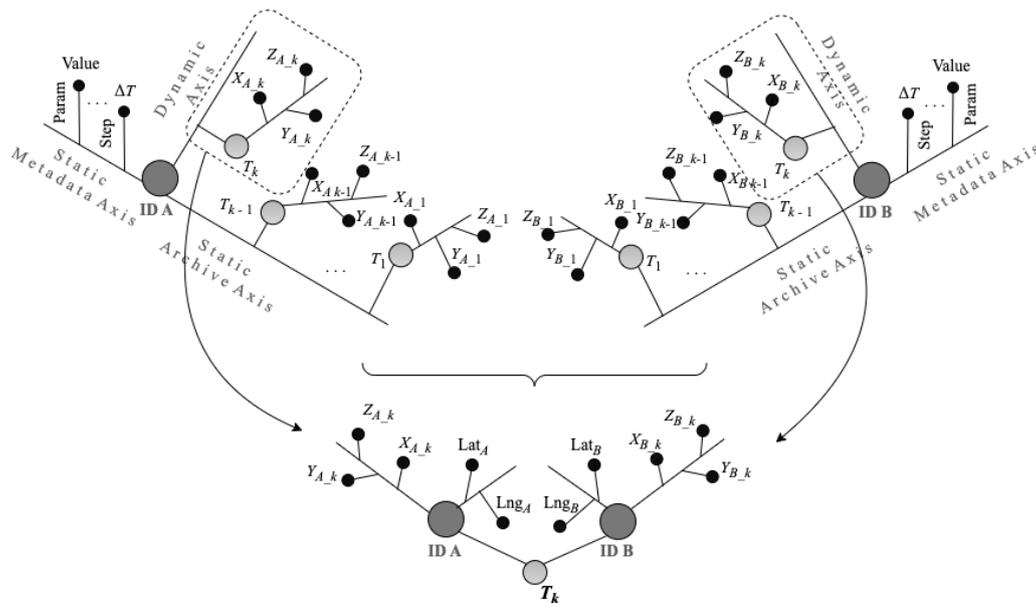


Рис. 3. Схема формирования новой мультиосевой модели при выборке данных геофизических полей
 Fig. 3. Scheme of formation of a new multi-axis model when sampling geophysical field data

В более сложном случае необходимо сформировать структуру, базирующуюся на данных регистрации или моделирования геофизического поля несколькими источниками (в разных пространственных точках) за определенный период времени. В этом случае центральным элементом новой структуры является искомая временная метка, для которой необходимо определить комплекс геофизических данных. Каждый отдельный источник, по которому присутствует узел с одноименной временной меткой (в любой из осей данных), формирует новую ось, исходящую из центральной оси с заданной временной меткой. Как и в предыдущем случае, для каждой новой оси (по источнику данных) полностью копируется статичная ось метаданных (при необходимости), либо новая структура обходится полностью без нее. Здесь отметим, что операции формирования новой оси метаданных считаются в данном случае вычислительно нецелесообразными ввиду небольшого числа описываемых атрибутов. Оси данных также формируются в зависимости от искомой временной метки. Фактически в результирующей структуре сохраняется единственная ось данных, содержащая фрагмент с данными, соответствующими искомой временной метке (рис. 3).

2. Формализация мультиосевой модели данных геофизических полей

Мультиосевая модель данных геофизических полей в общем виде представляет собой тройку параметров следующего формата:

$$A = (S_m, D_d, S_d), \quad (1)$$

где S_m – статичная ось метаданных, D_d – динамическая ось оперативных данных, S_d – статическая ось архивных данных, A – центральный компонент модели, характеризующий источник или геопрограммную точку привязки геофизических данных.

Каждая из представленных осей содержит, в свою очередь, элементы, соответствующие описываемым ею данным. Так, статичная ось метаданных S_m представляет собой множество метаданных, заданных совокупность пар вида «атрибут–значение», каждая из которых, в свою очередь, является дочерней ветвью иерархии с родительским элементом в центральном компоненте модели, что может быть описано соотношениями вида:

$$S_m = \bigcup_{i=1}^n \{a_i^s, v_i^s\}; \quad (2)$$

где n – количество атрибутов в оси метаданных модели, a_i^s, v_i^s – атрибут и значение атрибута метаданных соответственно.

Аналогичным образом может быть представлена структура динамической оси оперативных данных и статичной оси архивных данных геофизических полей:

$$D_d = \bigcup_{i=1}^k \{a_i^o, v_i^o\}; \quad (3)$$

$$S_d = \bigcup_{i=1}^l \{a_i^d, v_i^d\};$$

где k, l – количество атрибутов в осях оперативных и архивных данных модели соответственно, a_i^o, v_i^o – атрибут и значение атрибута оперативных данных, a_i^d, v_i^d – атрибут и значение атрибута архивных данных.

Каждому атрибуту оси модели ставится в соответствие определенный домен, характеризующий множество возможных значений рассматриваемого атрибута оси (атрибуты, в свою очередь, могут характеризовать как данные, так и метаданные, однако в последнем случае ввиду статичности и незначительного объема представляемых данных возможно не описывать домен для метаданных). Для динамической и статичной осей данных множества атрибутов, заданных элементами a_i^o и a_i^d (оперативные и архивные соответственно), должны быть эквивалентными, поскольку последующая обработка в соответствии с предлагаемым решением предполагает перенос ветви динамической оси данных в статичную ось архивных данных без каких-либо дополнительных изменений в заданных парах значений и атрибутов. Представляется целесообразным ввести единый домен для одноименных (однотипных) атрибутов обеих осей данных таким образом, чтобы обеспечить перенос данных с одной оси на другую без нормализации соответствующих значений. В общем виде домен данных для атрибута a любой оси данных можно представить следующим образом:

$$\exists D = \{d_1, d_2, \dots, d_p\} : \forall \{a_i^o, v_i^o\}, \{a_j^d, v_j^d\} v_i^o, v_j^d \in D, i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, l. \quad (4)$$

В каждой оси данных (как динамической, так и статичной) формирование отдельных дочерних осей, каждая из которых соответствует определенной временной метке, осуществляется посредством специализированных транзакций. При этом при оперировании осями имеют место транзакции двух видов – чтение и запись соответственно. Для формализованного описания осевых транзакций представляется целесообразным воспользоваться семантикой Эрбранта [10]:

$$S(\Delta T) = r_1(D_d)w_1(S_d)r_2(D_s)w_2(D_d) : D_d \neq \text{null}, D_s \neq \text{null}, \quad (5)$$

где r_i – i -я процедура считывания данных, w_i – i -я процедура записи данных в соответствующие оси.

Переход данных от динамической оси данных к статичной является двухфазным. На первой фазе выполняются две итерации считывания и записи данных: данные считываются в виде дочерней оси динамической оси оперативных данных (операция r_1) и направляются для записи в статичную ось архивных данных (операция w_1). На второй фазе выполняется заполнение динамической оси новой дочерней осью взамен той, что была передана в статичную ось архивных данных. Для этого используется итерация чтения (операция r_2) из внешнего источника данных и записи (операция w_2) непосредственной в качестве новой дочерней оси в искомую ось в динамическую ось оперативных данных. В качестве внешнего источника (D_s) может выступать ресурс соответствующей системы регистрации параметров поля (например, в случае геомагнитного поля в качестве таковых выступают магнитные обсерватории и вариационные станции) либо результат выполнения программного решения, обеспечивающего моделирование и расчет искомых параметров поля. Транзакция считается завершенной тогда, когда завершены обе операции записи в каждую из представленных осей данных. В случае, если на каком-то

из этапов по тем или иным причинам был зафиксирован сбой, выполняется откат соответствующей транзакции.

В каждый момент времени экземпляр мультиосевой модели данных для фиксированного источника (геопространственной привязки) находится в определенном состоянии. В контексте предложенной модели такое состояние представляет собой некоторую модель сигнатуры

$$\Sigma_3 = \{S_m^n, D_d^k, S_d^l\} \quad (6)$$

с основным множеством, представленным соответственно значениями атрибутов в n дочерних узлах-осях статичной оси метаданных, k дочерних узлах-осях динамической оси оперативных данных, l дочерних узлах-осях статичной оси архивных данных.

В общем случае каждая новая итерация фиксирует преобразование экземпляра модели в новое состояние, фактически получаемое переносом узла из одной оси в другую и появлением нового узла в динамической оси по истечении указанного временного интервала ΔT :

$$\Sigma_3 = \{S_m^n, D_d^k, S_d^l\} \xrightarrow{\Delta T} \Sigma_3' = \{S_m^n, D_d^k, S_d^{l+1}\}. \quad (7)$$

В целом можно рассматривать мультиосевую модель данных как дерево t с конечным числом упорядоченных элементов неопределенной глубины и арности. В общем виде узлы соответствующего дерева t возможно пометить символами некоторого конечного алфавита Σ . В этом контексте домен дерева t , рассматриваемого в качестве некоторой логической структуры, является множеством узлов t , условно обозначаемым $Dom(t)$.

Рассмотрим дерево t как неранжированное дерево таким образом, что имеет место некоторая структура $\sigma(h)$, где $\sigma \in \Sigma$, h – последовательность неранжированных деревьев, определяемая следующим образом:

$$H_\Sigma \ni h ::= \begin{cases} \sigma(h), h', \text{ непустая последовательность деревьев;} \\ \{ \}, \text{ пустая последовательность деревьев.} \end{cases} \quad (8)$$

Множество неранжированных деревьев обозначим как T_Σ^2 . Тогда каждая ось дерева t может в общем виде рассматриваться как бинарное дерево, которое является либо σ -размеченным корнем двух поддеревьев ($\sigma \in \Sigma$), либо пустым деревом:

$$T_\Sigma^2 ::= \begin{cases} \sigma(t, t'), \text{ узел;} \\ \varepsilon, \text{ пустое дерево.} \end{cases} \quad (9)$$

Неранжированные деревья преобразуются в бинарные деревья с помощью функции $\beta(\cdot)$ вида:

$$\begin{aligned} \beta(\cdot) &= H_\Sigma \rightarrow T_\Sigma^2; \\ \beta(\sigma(h), h') &\xrightarrow{\text{def}} \sigma(\beta(h), \beta(h')); \\ \beta(\{ \}) &\xrightarrow{\text{def}} \varepsilon. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда формально $Dom(t)$ может быть представлен как некоторое подмножество \mathbb{N}^* , определяемое следующим образом:

$$\begin{aligned} Dom(t) &= \{\varepsilon\} \cup \{iu \mid i \in \{1, \dots, n\}, u \in Dom(t_i)\}; \\ t &= \{t_1, \dots, t_n\}, \sigma \in \Sigma, n \geq 0; t_1, \dots, t_n \in T_\Sigma^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Представляется целесообразным рассмотреть отношения между осями и их дочерними осями в мультиосевой модели данных полей в терминах реляционного словаря вида: $(\prec_{ch}, \prec_{sb}, \{O_\sigma \mid \sigma \in \Sigma\})$. Здесь O_σ являются предикатами унарного отношения. Тогда для каждого размеченного узла $\sigma \in \Sigma$ O_σ представляет собой набор узлов, помеченных соответственно как σ . Символы \prec_{ch}, \prec_{sb} являются бинарными предикатами. Первый из них обозначает дочернее отношение (child relation) вида $(v, v \cdot i), v, v \cdot i \in Dom(t)$. Тогда \prec_{sb} является отношением соседства узлов (sibling) вида:

$$(v \cdot i, v \cdot (i+1)), v \cdot i, v \cdot (i+1) \in Dom(t).$$

С учетом сказанного имеют место соотношения вида:

$$\begin{aligned}
 O_{\sigma} &= \{S_m \prec_{sb} D_d \prec_{sb} S_d\}; \\
 S_m &\prec_{ch} \bigcup_{i=1}^n \{a_i^s, v_i^s\}; \{a_i^s, v_i^s\} \prec_{sb} \{a_{i+1}^s, v_{i+1}^s\} \forall i = 1, \dots, n-1; \\
 D_d &\prec_{ch} \bigcup_{i=1}^k \{a_i^o, v_i^o\}; \{a_i^o, v_i^o\} \prec_{sb} \{a_{i+1}^o, v_{i+1}^o\} \forall i = 1, \dots, k-1; \\
 S_d &\prec_{ch} \bigcup_{i=1}^l \{a_i^d, v_i^d\}; \{a_i^d, v_i^d\} \prec_{sb} \{a_{i+1}^d, v_{i+1}^d\} \forall i = 1, \dots, l-1.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

3. Апробация и оценка эффективности предложенного решения

Как правило, данные геофизических полей содержатся в базах данных с реляционной структурой [11–13], однако наличие метаданных и тензорных данных требует пересмотреть традиционные методы хранения. Поскольку представленная в данной работе многоосевая модель данных имеет древовидную структуру, было принято решение использовать XML (eXtensible Markup Language, расширяемый язык разметки) [14–16]. Необходимо построить рассматриваемую XML-структуру в элементоцентричной манере таким образом, чтобы все данные и отдельные суррогатные узлы были заданы в виде XML-элементов. Сказанное касается в том числе и суррогатного корневого узла всей интегральной структуры данных, поскольку в целом данный компонент вводится искусственно для поддержания иерархической структуры значимых данных и не предполагает никаких иных характеристик (рис. 4).

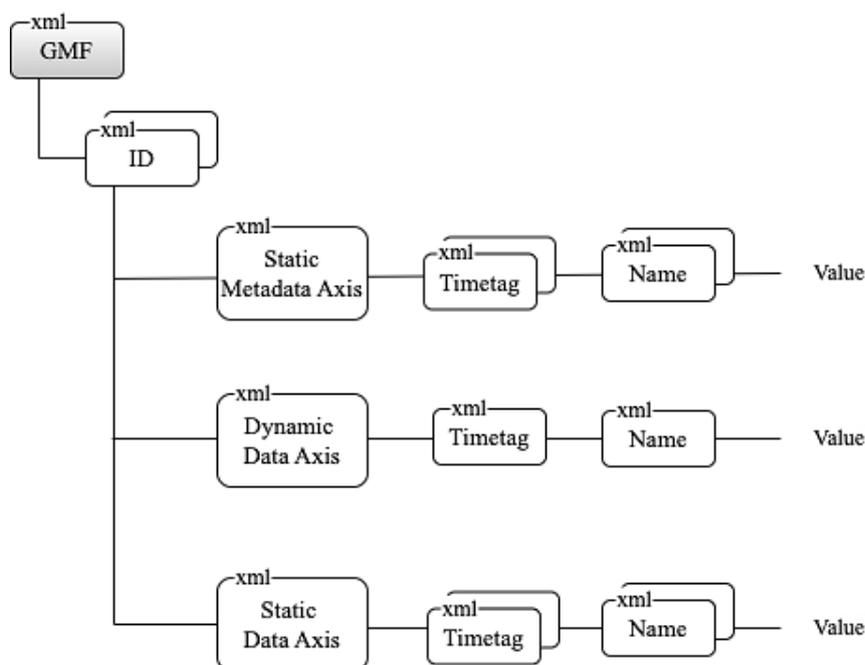


Рис. 4. XML-структура мультиосевой модели данных геофизических полей

Fig. 4. XML structure of the multi-axis model of geophysical field data

В целях создания структуры XML-документа следует описывать ее в виде XML-схемы [17], что позволит производить валидацию итоговой схемы после внесения изменений и добавления новых источников данных, при этом сохранив элементоцентричную структуру. С учетом древовидной структуры целесообразно производить запросы, основываясь на спецификациях XPath [18, 19].

Эффективность использования мультиосевой модели для хранения геофизических данных оценивалась путем сравнения с другими известными подходами (а именно с реляционным представлением и текстовыми CSV-файлами) с использованием набора геомагнитных данных из проекта SuperMAG, а также метрик скорости получения и внесения данных. Мультиосевая модель при этом была построена в формате XML с использованием СУБД Sedna [20, 21]. Результирующие данные представлены в формате XML/KML [22, 23].

Было установлено, что использование мультиосевой структуры данных для хранения геофизической информации увеличивает скорость выполнения однопредикативных запросов на ~ 25,7%, мультипредикативных запросов на ~ 20,1%, а скорость вставки новых записей на ~ 21,3% в среднем, что подтверждает целесообразность реализации предложенного решения.

Заключение

Информация о геофизических полях на текущий момент играет большую роль в понимании процессов, протекающих на поверхности и за пределами Земли, а также широко применяется в поддержке принятия решений, в том числе для снижения негативного влияния геофизических явлений на технологическую безопасность. Поэтому совершенствование известных методов хранения и организации геофизических данных в целях повышения производительности запросов к БД и снижения времени отклика представляется актуальной задачей.

В данной работе была представлена мультиосевая модель хранения и организации геофизических данных, которая основывается на элементоцентричной разметке и иерархической структуре хранения информации. Модель отличается использованием статичной и динамической осей, которые вводятся в соответствии с тензорной спецификой геофизического поля. Центральный узел осей соответствует источнику данных, в то время как сами оси используются для представления метаданных, а также архивных и оперативных данных, взаимодействие между которыми реализовано с использованием триггеров и темпоральных предикатов на уровне фоновых процессов.

Список источников

1. Geomagnetic Observations and Models / M. Manda, M. Korte (eds). Dordrecht : Springer, 2011. (IAGA Special Sopron Book Series; 5).
2. INTERMAGNET technical reference manual. Version 4.6 / ed. by S.-L. Benoît. Edinburgh : INTERMAGNET. BGS, 2012.
3. 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. 1 (74). P. 1–21. doi: 10.1186/s40623-022-01574-w
4. Lazzeri C., Samsonov A., Forsyth C., Branduardi-Raymont G., Bogdanova Yu. A Statistical Study of the Properties of, and Geomagnetic Responses to, Large, Rapid Southward Turnings of the Interplanetary Magnetic Field // *J. of Geophysical Research*:
5. Peng Z., Laramee S. Higher Dimensional Vector Field Visualization. A Survey // *Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG '09)*. 2009. P. 149–163.
6. Hergl C., Blecha C., Kretschmar 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 (6). P. 135–161. doi: 10.1111/cgf.14209
7. Jilesh V., Pournami A. On a generalization of Laplace distribution with applications. *International // J. of Data Science and Analytics*. 2025. V. 19 (1). P. 1–10. doi: 10.1007/s41060-024-00706-7
8. He Z., Hu X., Teng Yu., Zhang X., Shen X. Data agreement analysis and correction of comparative geomagnetic vector observations // *Earth, Planets and Space*. 2022. V. 74 (1). Art. 29. doi: 10.1186/s40623-022-01583-9
9. Huang Y., Wu L., Li D. Theoretical Research on Full Attitude Determination Using Geomagnetic Gradient Tensor // *The J. of Navigation*. 2015. V. 68 (5). P. 951–961. doi: 10.1017/S0373463315000259
10. Paulo O., Chuangjie X. On the Herbrand functional interpretation // *Mathematical Logic Quarterly*. 2020. V. 66 (1). P. 91–98. doi: 10.1002/malq.201900067
11. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Индуктивный метод восстановления временных рядов геомагнитных данных // *Труды СПИИРАН*. 2018. № 2 (57). С. 104–133. doi: 10.15622/sp.57.5
12. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Оценка влияния геомагнитной активности на метрологические характеристики инклинометрических информационно-измерительных систем // *Измерительная техника*. 2017. № 6. С. 21–24.
13. Vorobev A.V., Vorobeva G.R., Yusupova N.I. Conception of geomagnetic data integrated space // *SPIIRAS Proceedings*. 2019. V. 18 (2). P. 390–415. doi: 10.15622/sp.18.2.390-415
14. Ali M., Khan M. Enhancing XML Data Parsing and Querying Performance on Multi-Core Architectures // *Statistics Computing and Interdisciplinary Research*. 2024. V. 6 (1). P. 75–89. doi: 10.52700/scir.v6i1.158
15. 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. doi: 10.18287/2412-6179-CO-1127
16. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Подход к динамической визуализации разнородных геопространственных векторных изображений // *Компьютерная оптика*. 2024. Т. 48, № 1. С. 123–138. doi: 10.18287/2412-6179-CO-1279
17. Jamal S., Rahman C., Abdulkarim M. XML Schema Validation Using Java API for XML Processing // *UKH Journal of Science and Engineering*. 2022. № 6. P. 33–41. doi: 10.25079/ukhjse.v6n1y2022

18. Chen R., Wang Z., Su H., Xie S., Wang Z. Parallel XPath query based on cost optimization // *The Journal of Supercomputing*. 2022. V. 78 (2). P. 1–30. doi: 10.1007/s11227-021-04074-y
19. Areces C., Fervari R. Axiomatizing Hybrid XPath with Data // *Logical Methods in Computer Science*. 2021. V. 17 (3). P. 1–37. doi: 10.46298/lmcs-17(3:5)2021
20. Chernenkiy V.M., Gapanyuk Y.E., Kaganov Y.T., Dunin I.V., Lyaskovsky M.A., Larionov V. Storing Metagraph Model in Relational, Document-Oriented, and Graph Databases // *Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains*. 2018. V. 2277. P. 82–89.
21. Terekhov V., Gapanyuk Y., Kanev A. Metagraph representation for overcoming limitations of existing knowledge bases // *28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. IEEE, 2021. P. 458–464.
22. Zichar M. Geovisualization based upon KML // *Journal of Agricultural Informatics*. 2021. V. 3 (1). P. 19–26. doi: 10.17700/jai.2012.3.1.49
23. Ortinez A., Ruiz S., Luis G., Ortega E., Garcia-Reynoso A., Peralta O., López-Gaona A., Castro T., Martinez Arroyo A. Emission inventory point source visualization on Google Earth and integrated with HYSPLIT model // *Atmósfera*. 2020. V. 34 (2). P. 1–36. doi: 10.20937/ATM.52834

References

1. Mandea, M. & Korte, M. (eds) (2011) *Geomagnetic Observations and Models*. Dordrecht: Springer. pp. 149–181.
2. Benoît, S.-L. (ed.) (2012) *Intermagnet Technical Reference Manual. Version 4.6 (2012)*. Edinburgh: INTERMAGNET.
3. Califf, S., Alken, P., Chulliat, A., Anderson, B., Rock, K., Vines, S., Barnes, R. & Liou, K. (2022) Investigation of geomagnetic reference models based on the Iridium constellation. *Earth, Planets and Space*. 1(74). pp. 1–21. DOI: 10.1186/s40623-022-01574-w
4. Lazzeri, C., Samsonov, A., Forsyth, C., Branduardi-Raymont, G. & Bogdanova, Yu. (2024) 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*. 129(9). pp. 1–15. DOI: 10.1029/2023JA032160
5. Peng, Z. & Laramée, S. (2009) Higher Dimensional Vector Field Visualization. A Survey. *Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG '09)*. pp. 149–163.
6. Hergl, C., Blecha, C., Kretzschmar, V., Raith, F., Gunther, F., Stommel, M., Jankowai, J., Hotz, I., Nagel, T. & Scheuermann, G. (2021) Visualization of Tensor Fields in Mechanics. *Computer Graphics Forum*. 40(6). pp. 135–161. DOI: 10.1111/cgf.14209
7. Jilesh, V. & Pournami, A. (2025). On a generalization of Laplace distribution with applications. *International Journal of Data Science and Analytics*. 19(1). pp. 1–10. DOI: 10.1007/s41060-024-00706-7
8. He, Z., Hu, X., Teng, Yu., Zhang, X. & Shen, X. (2022) Data agreement analysis and correction of comparative geomagnetic vector observations. *Earth, Planets and Space*. 74. DOI: 10.1186/s40623-022-01583-9
9. Huang, Y., Wu, L. & Li, D. (2015) Theoretical Research on Full Attitude Determination Using Geomagnetic Gradient Tensor. *The Journal of Navigation*. 68(5). pp. 951–961. DOI: 10.1017/S0373463315000259
10. Paulo, O. & Chuangjie, X. (2020). On the Herbrand functional interpretation. *Mathematical Logic Quarterly*. 66(1). pp. 91–98. DOI: 10.1002/malq.201900067
11. Vorobiev, A.V. & Vorobieva, G.R. (2018) Induktivnyy metod vosstanovleniya vremennykh ryadov geomagnitnykh dannykh [Inductive method for reconstructing time series of geomagnetic data]. *Trudy SPIIRAN*. 2(57). pp. 104–133. DOI: 10.15622/sp.57.5
12. Vorobiev, A.V. & Vorobieva, G.R. (2017) Otsenka vliyaniya geomagnitnoy aktivnosti na metrologicheskie kharakteristiki inklinometricheskikh informatsionno-izmeritel'nykh sistem [Assessment of the influence of geomagnetic activity on the metrological characteristics of inclinometric information-measuring systems]. *Izmeritel'naya tekhnika*. 6. pp. 21–24.
13. Vorobiev, A.V., Vorobieva, G.R. & Yusupova, N.I. (2019) Conception of geomagnetic data integrated space. *Trudy SPIIRAN*. 18(2). pp. 390–415. DOI: 10.15622/sp.18.2.390-415
14. Ali, M. & Khan, M. (2024). Enhancing XML Data Parsing and Querying Performance on Multi-Core Architectures. *Statistics Computing and Interdisciplinary Research*. 6(1). pp. 75–89. DOI: 10.52700/scir.v6i1.158
15. Vorobiev, A.V. & Vorobieva, G.R. (2023) Podkhod k obnaruzheniyu i ustraneniyu artefaktov prostranstvennykh izolinii v pri-lozheniyakh Veb-GIS [Approach to detection and elimination of spatial isoline artifacts in Web GIS applications]. *Komp'yuternaya optika*. 47(1). pp. 126–136. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1127
16. Vorobiev, A.V. & Vorobieva, G.R. (2024) Podkhod k dinamicheskoy vizualizatsii raznorodnykh geoprostranstvennykh vektornykh izobrazheniy [Approach to dynamic visualization of heterogeneous geospatial vector images]. *Komp'yuternaya optika*. 48(1). pp. 123–138. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1279
17. Jamal, S., Rahman, C. & Abdulkarim, M. (2022) XML Schema Validation Using Java API for XML Processing. *UKH Journal of Science and Engineering*. 6. pp. 33–41. DOI: 10.25079/ukhjse.v6n1y2022
18. Chen, R., Wang, Z., Su, H., Xie, S. & Wang, Z. (2022) Parallel XPath query based on cost optimization. *The Journal of Supercomputing*. 78(2). pp. 1–30. DOI: 10.1007/s11227-021-04074-y
19. Areces, C. & Fervari, R. (2021). Axiomatizing Hybrid XPath with Data. *Logical Methods in Computer Science*. 17(3). pp. 1–37. DOI: 10.46298/lmcs-17(3:5)2021
20. Chernenkiy, V.M., Gapanyuk, Y.E., Kaganov, Y.T., Dunin, I.V., Lyaskovsky, M.A. & Larionov, V. (2018) Storing Metagraph Model in Relational, Document-Oriented, and Graph Databases. *Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains*. 2277. pp. 82–89.

21. Terekhov, V., Gapanyuk, Y. & Kanev, A. (2021) Metagraph representation for overcoming limitations of existing knowledge bases. *28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. IEEE. pp. 458–464.
22. Zichar, M. (2012). Geovisualization based upon KML. *Journal of Agricultural Informatics*. 3(1). pp. 19–26. DOI: 10.17700/jai.2012.3.1.49
23. Ortinez, A., Ruiz, S., Luis, G., Ortega, E., Garcia-Reynoso, A., Peralta, O., López-Gaona, A., Castro, T. & Martinez Arroyo, A. (2020) Emission inventory point source visualization on Google Earth and integrated with HYSPLIT model. *Atmósfera*. 34(2). pp. 1–36. DOI: 10.20937/ATM.52834

Информация об авторах:

Воробьева Гульнара Равилевна – доцент, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: Gulnara.vorobeva@gmail.com

Воробьев Андрей Владимирович – доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой информатики Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: Geomagnet@list.ru

Орлов Глеб Олегович – аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: orlovgleb99@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Vorobeva Gulnara R. (Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: Gulnara.vorobeva@gmail.com

Vorobev Andrey V. (Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Computer Science, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: Geomagnet@list.ru

Orlov Gleb O. (Post-graduate Student of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: orlovgleb99@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 18.01.2025; принята к публикации 02.06.2025

Received 18.01.2025; accepted for publication 02.06.2025