

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АДАПТИВНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И ГЛИФОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ (НА ПРИМЕРЕ ГЕОМАГНИТНОЙ ИНФОРМАЦИИ)

Г. О. Орлов • Э. Ф. Фарваев

Аннотация. Одним из магистральных направлений развития современных информационных технологий является создание новых и модернизация известных решений по обработке, анализу и визуализации геопространственной информации, активно используемой в системах поддержки принятия решений (в частности, для обеспечения функционирования объектов техносферы в экстремальных ситуациях). Важнейшей задачей здесь представляется максимально точное определение атрибутивных значений в точках, в которых физические измерения недоступны / невозможны всегда или в течение длительного периода времени. В работе на примере геомагнитных данных предложен и формализован адаптивный подход к интерполяции, при котором для различных пространственных областей и при различном сочетании внутренних и внешних факторов используются наиболее эффективные с точки зрения минимизации ошибки восстановления данных модели и методы. Применительно к рассматриваемым данным предлагается подход к визуализации, учитывающий их внутреннюю структуру, представленную в формате векторов и тензоров. Посредством многоосевых глифов сложной формы формализуется пространственная визуализация сложных геопространственных данных, сформированных на основе элементов тензорного исчисления. Предлагается исследовательский веб-ориентированный прототип решения, на примере пространственных данных о параметрах геомагнитного поля и его вариаций демонстрирующий эффективность предложенных решений.

Ключевые слова: геопространственные данные; геомагнитные данные; пространственная интерполяция; визуализация.

ВВЕДЕНИЕ

Масштаб использования геопространственной информации во всем мире непрерывно растет. На сегодняшний день практически на всех уровнях общества признается ценность геопространственной информации, которая может играть значимую роль в развитии экономики, обеспечении жизненно важных услуг, поддержании устойчивого развития, улучшая тем самым жизнь людей во всем мире. При этом количество участников, вовлеченных в формирование, управление и сопровождение геопространственной информации, значительно выросло в последние десять лет, и этот рост продолжится и даже ускорится в ближайшие пять–десять лет.

Ярким примером геопространственной информации является геомагнитная информация, которая в общем случае является результатом наблюдения параметров магнитного поля Земли и его вариаций. Сбор, обработка и анализ геомагнитных данных необходимы как для исследования природы и механизмов изменения магнитного поля Земли, так и для обеспечения техносферной безопасности [1, 2]. В контексте последнего представляется целесообразным отметить, что геомагнитные вариации (изменения значений параметров геомагнитного поля) представляют собой потенциальную глобальную угрозу для широкого спектра социально-экономических сфер деятельности общества.

Крайне неравномерное распределение средств регистрации геомагнитных данных как результатов наблюдения параметров геомагнитного поля и его вариаций сопровождается значительным недостатком информации, необходимой для принятия решений на основании геомагнитной обстановки (в частности, в труднодоступных высокоширотных регионах) [3, 4].

Также следует учитывать, что визуализация геопространственной информации является достаточно комплексной задачей, поскольку она состоит из большого числа компонентов, каждый из которых имеет одинаковое расположение в пространстве [5]. В качестве примера такой комплексной сущности можно привести геомагнитное или гравитационное поле, каждое из которых задается набором векторов, состоящих из трех или четырех составляющих и для которых координатные оси могут быть направлены по-разному. При этом прочие решения для визуализации такого рода полей не способны отобразить все необходимые параметры комплексно, а лишь раскладывают данную визуализацию на отдельные слои, каждый из которых отвечает за отдельные составляющие, что перегружает интерфейс и увеличивает время рендера изображения.

1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ГЕОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА

Рассмотрим систему геомагнитного мониторинга как совокупность составляющих (рис. 1) [6–8]. Если обозначить ее как S , то имеет место выражение:

$$S = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}, \quad (1)$$

где m_i – магнитная обсерватория / вариационная станция, на которой осуществляется регистрация параметров геомагнитного поля и его вариаций ($i = 1, \dots, N$).

Множество прошедших обработку и готовых к использованию геомагнитных данных обозначим как D . При этом целевой функцией по отношению к системе геомагнитного мониторинга S будет являться функция, задающая правила отображения множества S во множество D (получение геомагнитных данных по результатам геомагнитного мониторинга):

$$f: S \rightarrow D: D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}, \quad (2)$$

где d_i – геомагнитные данные, полученные по результатам обработки измерений i -й магнитной обсерватории / вариационной станции, на которой осуществляется регистрация параметров геомагнитного поля и его вариаций ($i = 1, \dots, N$).

При этом на результат отображения оказывают воздействие внешние и внутренние факторы, представленные соответственно множествами F_{in} и F_{out} :

$$f: S \rightarrow D: f_i: m_i \rightarrow d_i; f_i = g_i(p_i, t_i, F_{in}, F_{out}); p_i \supset (\text{lat}_i, \text{lng}_i), i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где p_i – пространственная точка, где размещается магнитная обсерватория / вариационная станция; пространственная точка задается парой географических координат (широта lat , долгота lng); g_i – функция, характеризующая воздействие на результат сопоставления i -х элементов множеств внутренних и внешних факторов, времени (t_i) и пространственного расположения (p_i).

Здесь возникает проблема геомагнитного мониторинга, связанная с тем, что средства регистрации параметров геомагнитного поля и его вариаций распределены по земной поверхности крайне неравномерно. Известно, что наибольшее их количество представлено на территории Европы, в то время как иные регионы планеты охвачены средствами мониторинга весьма поверхностно. Пользователь, обратившись к мировому центру данных, может не получить необходимую ему информацию по той причине, что в данной пространственной точке p_k отсутствуют средства регистрации. Другой вариант – средства регистрации физически присутствуют в искомой пространственной точке p_k (пространственном регионе), но в требуемый момент времени не функционировали по тем или иным причинам.

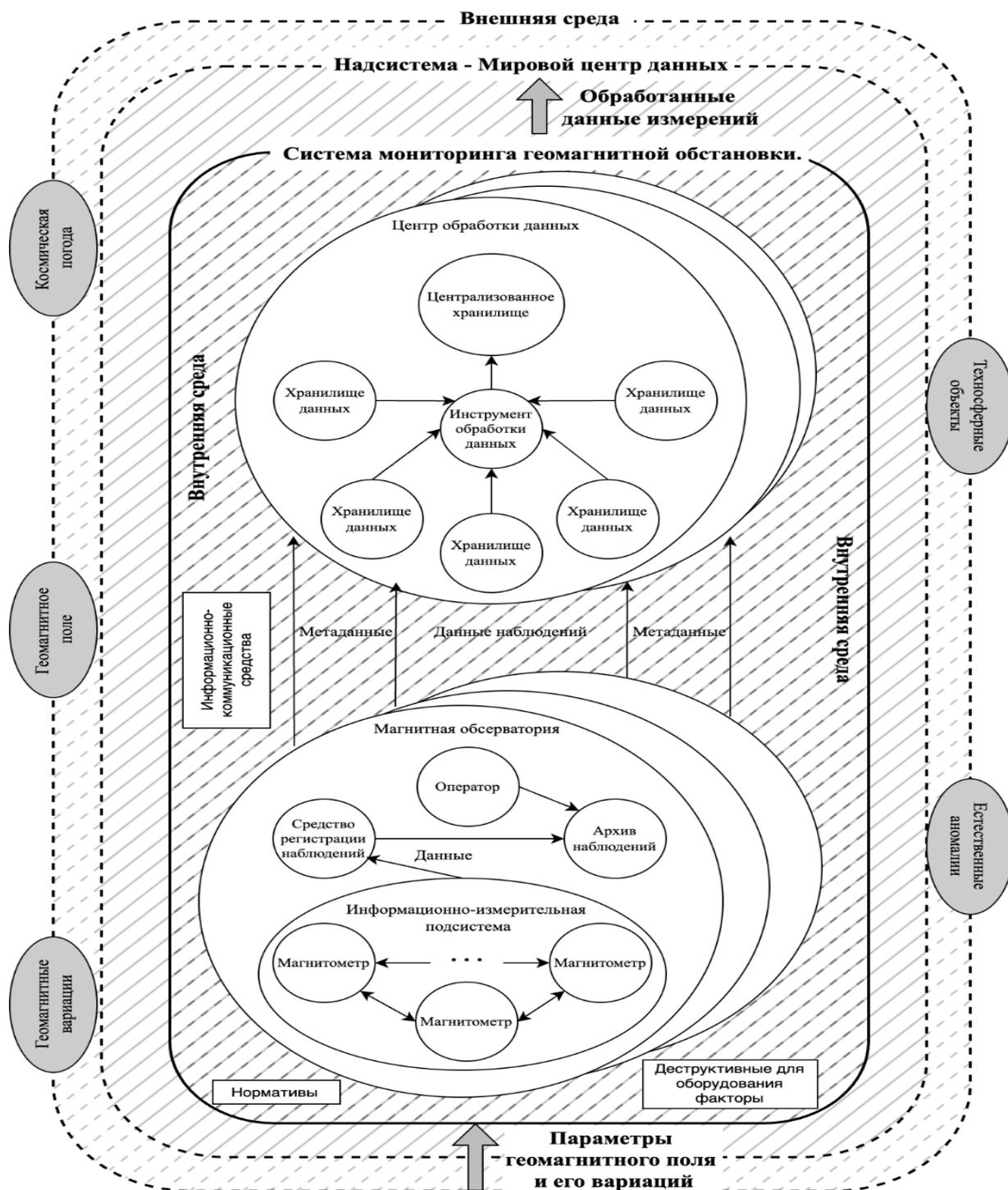


Рис. 1 Система геомагнитного мониторинга.

В терминах теории множеств:

$$\forall m_i \in M(i = 1, \dots, N) \exists f_k: m_i \rightarrow d_k: f_k = g_k(p_k, t_k, F_{in}, F_{out}); p_k \supset (\text{lat}_k, \text{lng}_k), \quad (4)$$

где p_k – пространственная точка, для которой необходимо определить параметры геомагнитного поля, но при этом отсутствует магнитная обсерватория / вариационная станция, на которой осуществляется регистрация параметров геомагнитного поля и его вариаций; пространственная точка задается парой географических координат (широта / lat, долгота / lng); g_i – функция, характеризующая воздействие на результат сопоставления i -х элементов множеств внутренних и внешних факторов, времени (t_i) и расположения (p_i).

Соответственно необходимо решение, которое позволит оценивать геомагнитную обстановку в условиях дефицита результатов регистрации параметров геомагнитного поля и его вариаций. При этом искомые данные должны учитывать весь комплекс внутренних и внешних факторов, способных оказывать на них негативное искажающее значение, чтобы не нанести при своем использовании ущерба от неверно принятых решений.

2. МЕТОД АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

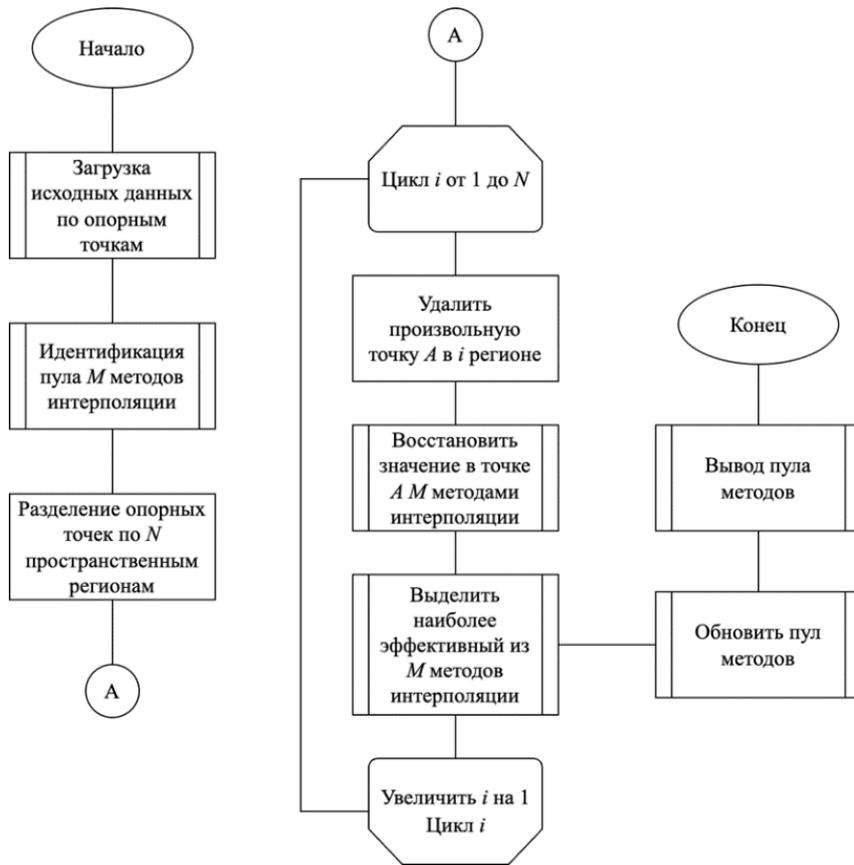
Представляется целесообразным использовать специфику пространственно-временного распределения геоданных (в частности, параметров геомагнитного поля и его вариаций), а также их зависимость от различных внешних и внутренних факторов для получения наилучшего с точки зрения минимизации ошибки восстановления данных метода интерполяции. На примере геомагнитных данных были проведены вычислительные эксперименты для оценки эффективности различных методов пространственной интерполяции для разных сочетаний внешних и внутренних факторов. Были условно выделены три широтные группы восстанавливаемых данных: высокоширотные, низкоширотные и приэкваториальные области. Исходные данные от магнитных обсерваторий и вариационных станций были получены посредством API, обеспечивающего обращение к данным проекта SuperMAG (URL: <https://supermag.jhuapl.edu/mag/>) [9, 10].

Алгоритм решения может быть сформулирован следующим образом. Для имеющегося набора пространственных данных выполняется серия вычислительных экспериментов с целью выявления результативности различных методов для отдельных областей и внешних факторов. Далее отдельные модели пространственной интерполяции могут быть обучены на имеющихся наборах пространственных данных (как, к примеру, необходимо для реализации любого типа пространственного кригинга). Формируется пул методов. Далее выполняется непосредственно процедура пространственной интерполяции. Для этого для каждой обрабатываемой пространственной точки оценивается ее принадлежность тому или иному пространственному региону, выделенному и проанализированному ранее. В зависимости от геопространственной привязки выделяется группа методов интерполяции с наилучшими показателями эффективности восстановления данных с учетом соответствующих внешних факторов. На последующем шаге пользователь определяет одну или более пространственных точек для выполнения процедуры пространственной интерполяции. На основании этого выделяется наиболее эффективный метод интерполяции, который и применяется для восстановления данных.

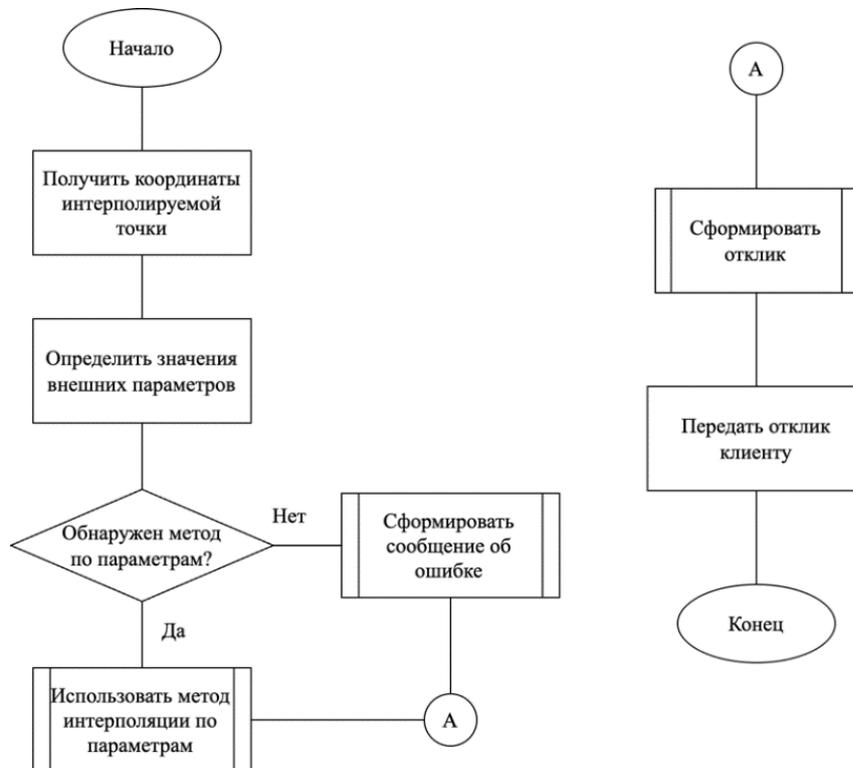
Проведенный применительно к геомагнитным данным сравнительный анализ методов интерполяции позволил ранжировать представленные ранее методы по мере увеличения значения ошибки восстановления пространственных данных для различных пространственных регионов. Полученные результаты позволили обозначить подход, в котором каждой пространственной области и заданным внешним факторам (в данном случае – уровню геомагнитной активности) ставятся в соответствие собственные методы интерполяции, что в совокупности позволит существенно уменьшить интегральную ошибку пространственной обработки (соответствующий алгоритм приведен на рис. 2).

Примечательно, что известные методы интерполяции показали хорошие результаты восстановления геомагнитных данных в области средних широт в условиях спокойной магнитосферы. При этом, по мере приближения к экстремальным широтам, значимый вклад в формируемый результат обработки вносят и указанные внешние факторы: чем выше значения индексов геомагнитной активности, тем больше ошибка пространственной интерполяции.

Серия проведенных вычислительных экспериментов позволила сделать заключение о том, что для пространственной интерполяции высокоширотных геомагнитных данных наилучшие результаты демонстрирует метод кригинга [11–13]. При этом в условиях спокойной магнитосферы наиболее эффективен простой кригинг, а в случае магнитной бури – метод универсального кригинга с константной функцией (так называемый кригинг с трендом).



а



б

Рис. 2 Алгоритм реализации адаптивной пространственной интерполяции.

В низких и средних широтах при любой геомагнитной активности наилучшие результаты пространственной интерполяции демонстрирует триангуляция Делоне [14, 15].

3. МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ГЛИФОВ И ТЕНЗОРНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

Среди известных методов визуализации геопространственной информации подход, основанный на использовании тензорных исчислений для визуализации векторного поля, больше прочих требует более детального рассмотрения, поскольку позволяет учитывать множество атрибутивных параметров. Однако на данный момент решения, которое использовало бы его в полной мере для повышения информативности итогового изображения, не существует.

В предлагаемом подходе каждый тензор, содержащий параметры геомагнитного поля, должен быть визуализирован при помощи определенного графического объекта, который бы имел достаточно свойств для тензора соответствующего ранга. Наиболее подходящим графическим объектом для данных целей является глиф (glyph) [16–18] ввиду большого количества его разновидностей и возможности придать ему необходимое количество атрибутов.

Эллипсоидный глиф является одним из наиболее простых и наглядных объектов. Тем не менее, используя суперэллипсы, построенные при помощи кривых Ламе [19], можно визуализировать достаточно сложные тензоры.

Чтобы принять во внимание параметры геомагнитного поля, необходимо отобразить соответствующие оси на глифе, расположив их начало в его центроиде. Каждая ось суперэллипсоидного глифа в таком случае соответствует оси тензора. Такой глиф предлагается обозначить в дальнейшем как «тензорный глиф» в рамках описания разработанного подхода к визуализации геопространственных полей.

Вытянутость эллипса и его цветовая характеристика вдоль каждой из его осей, находящихся в центре фигуры, отображают скалярную величину соответствующей проекции вектора напряженности геомагнитного поля. Чтобы наиболее эффективно визуализировать каждую составляющую, предлагается использовать монохромный градиент вдоль каждой из соответствующих осей. Для каждого диапазона значений в соответствии с предварительно составленной легендой будет накладываться определенный цветовой градиент, ширина которого зависит от таких параметров, как размер суперэллипса и количество его осей. В итоге анализ параметров геомагнитного поля будет проходить путем оценки интенсивности градиента и вытянутости фигуры по каждой ее оси, что дает возможность наглядно продемонстрировать распределение этих параметров, визуализируя глифы во всех точках исследуемого пространства.

Конечное изображение составляется из большого количества эллипсоидных глифов, каждый из которых располагается таким образом, что его центроид совмещается с точкой, соответствующей координатам возникновения геомагнитной аномалии (рис. 3). Изображение должно быть дополнено легендой, представляющей из себя цветовую шкалу для каждого диапазона значений. Поскольку такая визуализация использует только один пространственный слой для рендера изображения, при необходимости она может дополняться другими изображениями либо новыми слоя, не теряя важной информации об атрибутивных параметрах поля.

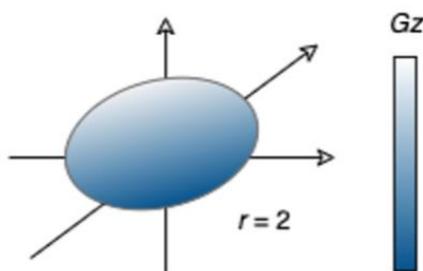


Рис. 3 Примеры визуализации симметричного суперэллипса для тензоров 2 ранга.

Также необходимо рассмотреть возникающий в рамках предложенного подхода исключительный случай, предполагающий нечетное количество осей эллипса, при котором он становится асимметричным. В обычном случае эллипс является фигурой, состоящей из кривых второго порядка, для которой справедливо следующее выражение:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (5)$$

где коэффициенты a и b определяют то, насколько эллипс будет вытянут вдоль соответствующих координатных осей.

Однако в рамках рассматриваемого метода визуализации данный подход не является валидным, поскольку имеются более двух осей и найти коэффициенты для построения эллипсоидного глифа не представляется возможным. В этом случае суперэллипс может быть выражен с помощью следующего соотношения [19]:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^n + \left(\frac{y}{b}\right)^n = 1, \quad (6)$$

где n – коэффициент, который определяется числом осей тензора, которые должны использоваться при построении соответствующего суперэллипса. В случае $n = 1$ в результате визуализации тензора будет получен ромб, вершины которого расположены на координатных осях. Когда значения данного коэффициента находятся в диапазоне $1 < n < 2$, результатом визуализации тензора является ромб с выпуклыми сторонами. В случае $n = 2$ будет получен эллипс, а если при этом еще и равны между собой коэффициенты a и b – окружность. Чем ближе значение коэффициента n будет подбираться к бесконечности, тем больше итоговая фигура будет похожа на прямоугольник.

Принимая во внимание тензорную специфику геомагнитного поля, целесообразно подбирать значение n , руководствуясь выражениями:

$$\forall G = [l, r, N] \exists S_G = \left(\frac{o_1}{a}\right)^n + \left(\frac{o_2}{b}\right)^n + \dots + \left(\frac{o_{r-1}}{z}\right)^n = 1; n = r + 1, \quad (7)$$

где G – это тензор, имеющий форму l , ранг r и число элементов N . В данном случае o_1, o_2, \dots, o_{r-1} – это параметры, которые ставятся в соответствие с осями эллипсоидного глифа, относящегося к рангу r визуализируемого тензора.

4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ

С целью апробации предлагаемого подхода к решению задачи пространственной интерполяции геомагнитных данных разработан исследовательский прототип веб-приложения (рис. 4), в рамках которого происходит вычисление и отображение атрибутивных значений магнитного поля Земли в произвольной точке.

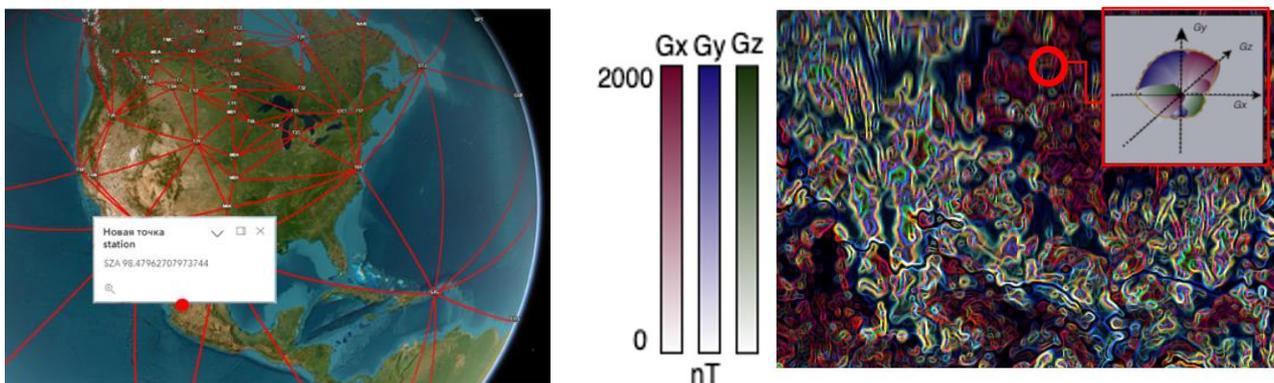


Рис. 4 Экранные формы исследовательского прототипа приложения.

В качестве исходных данных для анализа и визуализации использована информация из сервиса SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/>), который, в свою очередь, получает ее от ближайших магнитных обсерваторий. Разработка велась по шаблону MVC [20] на языке Python с использованием фреймворка Django. Приложение может как работать на стороне клиента, предоставляя интерфейс для визуализации, так и отправлять интерполированные данные другим приложениям посредством RESTful API [21, 22].

При проведении испытаний на клиентской стороне тестовый стенд был оснащен оборудованием со следующими техническими характеристиками: процессор Intel Core i5 10300H с частотой 2,5 ГГц, объем ОЗУ 4 ГБ, скорость интернет-соединения 52.4 Мбит/с. На серверной стороне был использован веб-сервер с процессором Intel® Xeon® Gold 6140 CPU @ 2.30 ГГц.

На каждом этапе изымалась одна пространственная точка, атрибутивное значение в которой было рассмотрено как неизвестное и требующее вычисления методами интерполяции. Далее полученный результат сравнивался с оригинальным значением. Для каждой комбинации внешних и внутренних факторов было проведено порядка 50 вычислительных экспериментов, что позволило оценить качество предложенного метода пространственной интерполяции. Результаты вычислений были визуализированы с использованием тензорных глифов.

Анализ полученных результатов показал, что применение предложенного адаптивного подхода к пространственной интерполяции позволяет снизить значение среднеквадратической ошибки восстановления пространственных данных по сравнению с известными подходами следующим образом: в среднеширотных областях – на 4.71 нТл, в высокоширотных областях – на 4.95 нТл, в низкоширотных областях – на 16.7 нТл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ системы геомагнитного мониторинга позволил выявить основные проблемы получения геомагнитных данных. В частности, была выявлена проблема отсутствия данных в произвольных точках земной поверхности по различным техническим и естественным причинам. Сформулирована концепция введения дополнительных компьютерных моделей в систему поддержки принятия решений на основе геомагнитной информации таким образом, чтобы обеспечить получение данных о геомагнитной обстановке в том числе и в тех точках, где отсутствуют или недоступны средства измерения.

В работе предлагается подход, основанный на комбинировании методов пространственной интерполяции, демонстрирующих наилучшие результаты (наименьшую ошибку) восстановления данных при различных сочетаниях внешних и внутренних условий. Предлагается на подготовительном этапе оценивать значение ошибки интерполяции, которую обеспечивают различные методы восстановления для различных пространственных областей и значений внешних факторов. Далее непосредственно при интерполяции определяется принадлежность восстанавливаемого значения пространственной области, оцениваются значения внешних факторов и определяется метод, наиболее эффективный в данном случае. По результатам выполняется восстановление атрибутивного значения выбранным методом.

На примере геомагнитной информации показана результативность предложенного решения. Для выделенных пространственных областей (высоко-, средне- и низкоширотные) и различного уровня геомагнитной активности (значения Кр-индекса) показано ранжирование методов интерполяции по их эффективности в контексте минимизации ошибки восстановления данных.

Полученные в ходе анализа существующих решений результаты указали на необходимость разработки нового решения для визуализации тензорных геопро пространственных полей. Достоинства существующих методов были учтены для реализации усовершенствованного подхода, в рамках которого визуализируются комплексные структуры данных. Новый подход, представленный в данной работе, именуется тензорным глифом. В качестве базового графического объекта в рамках данного подхода используются суперэллипсы, цветовой градиент которых

варьируется в зависимости от атрибутивных значений, а количество осей зависит от ранга тензора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность научному руководителю д-ру техн. наук, проф. Г. Р. Воробьевой за помощь в составлении алгоритмов интерполяции и визуализации, постановку задачи и полезное обсуждение вопросов. Также считаем необходимым отметить работы [23–26], оказавшие влияние на данное исследование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- [1] Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Sakharov Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data // *Appl. Sci.* 2022. No. 12. Pp. 15–22.
- [2] Авакян С. В., Воронин Н. А., Дубаренко К. А. Влияние магнитных бурь на аварийность систем электроэнергетики, автоматики и связи // *Глобальная энергия.* 2012. № 3-2 (154). С. 253–266. EDN [PESLKL](#). [[Avakyan S. V., Voronin N. A., Dubarenko K. A. “The influence of magnetic storms on accidents in electric power, automation and communication systems” // *Global Energy.* 2012. No. 3-2 (154), pp. 253–266. EDN [PESLKL](#). (In Russian).]]
- [3] Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Approach to assessment of the relative informational efficiency of intermagnet magnetic observatories // *Geomagn. Aeron.* 2018. No. 58. Pp. 625–628. DOI [10.1134/S0016793218050158](#). EDN [BVMYCD](#).
- [4] Воробьев А. В., Соловьев А. А., Пилипенко В. А., Воробьева Г. Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний // *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8. № 2. С. 93–100. EDN [YLVVDW](#). [[Vorobyov A. V., Soloviev A. A., Pilipenko V. A., Vorobyeva G. R. “Interactive computer model for forecasting and analyzing polar auroras” // *Solar-Terrestrial Physics.* 2022. Vol. 8, No. 2, pp. 93–100. EDN [YLVVDW](#). (In Russian).]]
- [5] Zou T. et al An overview of geospatial information visualization // 2018 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC), Suzhou, China. 2018. Pp. 250–254.
- [6] Корилов А. М., Павлов С. Н. Теория систем и системный анализ. М.: ИНФРА-М, 2024. 288 с. [[Korikov A. M., Pavlov S. N. *Systems Theory and System Analysis.* Moscow: INFRA-M, 2024. (In Russian).]]
- [7] Dieter M. Imboden, Pfenninger St. *Introduction to Systems Analysis: Mathematically Modeling Natural Systems.* Berlin: Springer, 2012.
- [8] Гвишиани А. Д., Панченко В. Я., Никитина И. М. Системный анализ больших данных для наук о Земле // *Вестник Российской академии наук.* 2023. Т. 93. № 6. С. 518–525. EDN [YCSNEI](#). [[Gvishiani A. D., Panchenko V. Ya., Nikitina I. M. “Systems analysis of big data for Earth sciences” // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences.* 2023. Vol. 93, No. 6, pp. 518–525. EDN [YCSNEI](#). (In Russian).]]
- [9] Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique // *J. Geophys. Res.* 2012. No. 117. Pp. A09213.
- [10] Waters C. L., Gjerloev J. W., Dupont M., Barnes R. J. Global maps of ground magnetometer data // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* 2015. No. 120. Pp. 9651–9660.
- [11] Kleijnen J. Kriging. Methods and applications // *CentER Discussion Paper Series.* 2017. No. 2017–047.
- [12] Zhang H., Tian Y., Zhao P. Dispersion curve interpolation based on kriging method // *Applied Sciences.* 2023. No. 13. Pp. 2557. DOI [10.3390/app13042557](#). EDN [EFYKTR](#).
- [13] Lebrez H., Bardossy A. Geostatistical interpolation by quantile kriging // *Hydrology and Earth System Sciences.* 2019. No. 23. Pp. 1633–1648.
- [14] Alexa M. Conforming weighted Delaunay triangulations // *ACM Transactions on Graphics.* 2020. No. 39. Pp. 1–16.
- [15] Weng Y., Cao J., Chen Zh. Global optimization of optimal Delaunay triangulation with modified whale optimization algorithm // *Engineering with Computers.* 2024. Pp. 1–22.
- [16] Weickert, J., Hagen, H. *Visualization and Processing of Tensor Fields.* Mathematics and Visualization. Berlin: Springer, 2006.
- [17] Yu Q., Zhang X., Huang Zh.-H. Tensor factorization-based method for tensor completion with spatio-temporal characterization // *Journal of Optimization Theory and Applications.* 2023. Vol. 199. Pp. 337–362. EDN [EHWIZX](#).
- [18] Xia S., Qiu D., Zhang X. Tensor factorization via transformed tensor-tensor product for image alignment // *Numerical Algorithms.* 2023. Vol. 95. Pp. 1251–1289.
- [19] Lamé curve. *Encyclopedia of Mathematics* [Электронный ресурс]. URL: http://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Lam%C3%A9_curve&oldid=53931 (дата обращения: 10.09.2024).
- [20] Rahman M. H., Naderuzzaman M., Kashem M. A., et al. Comparative study: performance of MVC frameworks on RDBMS // *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS).* 2024. Vol. 16. No. 1. Pp. 26–34.
- [21] Golmohammadi A., Zhang M., Arcuri A. Testing RESTful APIs: a survey // *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology.* 2023. Vol. 33. No. 1. Pp. 1–41.
- [22] Bogner J., Kotstein S., Pfaff T. Do RESTful API design rules have an impact on the understandability of Web APIs? // *Empirical Software Engineering.* 2023. No. 28.
- [23] Воробьев А. В. Методологические основы обработки пространственной информации для поддержки принятия решений на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнитных данных) // *СИИТ.* 2023.

- Т. 5. № 4(13). С. 3–27. EDN [LLACNX](#). [[Vorobyov A. V. “Methodological foundations of processing spatial information to support decision-making based on aggregated digital twins (using high-latitude geomagnetic data as an example)” // СИИТ. 2023. Vol. 5, No. 4(13), pp. 3-27. EDN [LLACNX](#). (In Russian).]]
- [24] Воробьева Г. Р. Методологические основы обработки неоднородной пространственно-временной информации в системах поддержки принятия решений на основе технологий больших данных (на примере геомагнитных данных) // СИИТ. 2023. Т. 5. № 3(12). С. 3–26. EDN [ВВУХQT](#). [[Vorobyova G. R. “Methodological foundations for processing heterogeneous spatio-temporal information in decision support systems based on big data technologies (using geomagnetic data as an example)” // СИИТ. 2023. Vol. 5, No. 3(12), pp. 3-26. EDN [ВВУХQT](#). (In Russian).]]
- [25] Орлов Г. О. Подход к обеспечению безопасности программного кода в веб-ориентированной среде // СИИТ. 2023. Т. 5. № 5(14). С. 68–77. EDN [НРСIMR](#). [[Orlov G. O. “Approach to ensuring security of software code in a web-oriented environment” // СИИТ. 2023. Vol. 5, No. 5(14), pp. 68-77. EDN [НРСIMR](#). (In Russian).]]
- [26] Буряковский П. К. Подход к определению кратчайшего расстояния между объектами разнородной геопрограммной геометрии // СИИТ. 2023. Т. 5. № 5(14). С. 88–94. EDN [ZWGBWG](#). [[Buryakovskiy P.K. “Approach to determining the shortest distance between objects of heterogeneous geospatial geometry” // СИИТ. 2023. Vol. 5, No. 5(14), pp. 88-94. EDN [ZWGBWG](#). (In Russian).]]

Поступила в редакцию 1 декабря 2024 г.

МЕТАДААННЫЕ / METADATA

Title: Models and methods of adaptive interpolation and glyph visualization of geospatial data (based on the example of geomagnetic information).

Abstract: One of the main directions of development of modern information technologies is creation of new and modernization of known solutions for processing, analysis and visualization of geospatial information actively used in decision support systems (in particular, to ensure functioning of technosphere objects in extreme situations). The most important task here is the most accurate determination of attribute values at points where physical measurements are unavailable / impossible always or for a long period of time. In this paper, using geomagnetic data as an example, an adaptive approach to interpolation is proposed and formalized, in which the most effective models and methods in terms of minimizing data recovery errors are used for different spatial areas and with different combinations of internal and external factors. Regarding the data under consideration, an approach to visualization is proposed that considers their internal structure, presented in the format of vectors and tensors. By means of multi-axis glyphs of complex shape, spatial visualization of complex geospatial data generated based on elements of tensor calculus is formalized. A research web-oriented prototype of the solution is proposed, using the example of spatial data on the parameters of the geomagnetic field and its variations, demonstrating the effectiveness of the proposed solutions.

Key words: geospatial data; geomagnetic data; spatial interpolation; visualization.

Язык статьи / Language: Русский / Russian.

Об авторах / About the authors:

ОРЛОВ Глеб Олегович

Уфимский университет науки и технологий, Россия.
Асп. каф. выч. математики и кибернетики. Магистр программной инженерии (Уфимск. ун-т науки и технологий, 2023). Иссл. в обл. геоинформ. и веб-технологий.
E-mail: orlovgleb99@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5123-3859>

ORLOV Gleb Olegovich

Ufa University of Science and Technology, Russia.
Postgrad. Stud., Dept of Computational Mathematics and Cybernetics. Master of Software Eng. (Ufa Univ. of Sci. & Tech., 2023).
Researcher in the field of geoinformation and web tech.
E-mail: orlovgleb99@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5123-3859>

ФАРВАЕВ Эмиль Фанильевич

Уфимский университет науки и технологий, Россия.
Асп. каф. выч. математики и кибернетики. Магистр прикл. математики и информатики (Казанск. федер. ун-т, 2022). Иссл. в обл. геоинформационных и веб-технологий.
E-mail: farvaev.emil@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4107-8950>

FARVAEV Emil Fanilevich

Ufa University of Science and Technology, Russia.
Postgrad. Stud., Dept of Computational Mathematics and Cybernetics. Master of Appl. Math and Comp. Sci. (Kazan Federal Univ., 2022). Research in the field of geoinformation and web tech.
E-mail: farvaev.emil@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4107-8950>