

Глифовый подход к веб-рендерингу геофизических полей в геоинформационных системах

Г.Р. Воробьева^{1,B}, А.В. Воробьев^{2,A,B}, Г.О. Орлов^{3,B}

^A ФГБУН Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

^B ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

¹ ORCID: 0000-0001-7878-9724, gulnara.vorobeva@gmail.com

² ORCID: 0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

³ ORCID: 0009-0003-5123-3859, orlovgleb99@mail.ru

Аннотация

Одной из значительных проблем визуализации геофизических полей является невозможность их единовременного представления интегрированным пространственным слоем с учетом комплексного характера анализируемых при этом параметров. В настоящее время обозначенная задача визуализации решается декомпозицией комплекса параметров на отдельные составляющие с последующим рендерингом пространственных слоев, не связанных друг с другом ни визуально, ни логически. В результате важная для исследования или принятия решений информация теряется из-за чрезмерной перегруженности геопространственного изображения.

В работе предлагается подход к визуализации многокомпонентных геофизических полей на основе графических примитивов, именуемых тензорными глифами и объединяемых в единый пространственный слой для представления нескольких компонент геофизического поля. Каждое отдельное изображение представляет собой суперэллипс, составленный из распределенных по осям и масштабированных согласно анализируемым величинам эллипсов, точки пересечения которых между собой и с осями дают опорные точки, соединенные с помощью кривых Ламе.

На примере параметров геомагнитного поля рассматривается работоспособность и наглядность предложенного решения. Дополнительно выполняется анализ метрик производительности его веб-реализации, что позволяет оценить качество соответствующих решений.

Ключевые слова: визуализация поля, геопространственное изображение, тензорное поле, глиф, суперэллипс.

1. Введение

В современных науках о Земле одним из магистральных направлений развития является создание решений, обеспечивающих визуализацию геомагнитных, гравитационных и прочих полей естественного и техногенного происхождения. Сложность проблемы визуализации полей связана с анизотропным характером их пространственного распределения, а также большим объемом данных, который необходимо при этом обработать и отобразить, к примеру, на картографической подложке.

Вместе с тем значимость визуализации геофизических полей трудно переоценить. Так, к примеру, визуализация геомагнитных и гравитационных полей является важным инструментом сейсмологов для обнаружения аномалий, а также интерпретации геофизических данных для геологического истолкования магнитных и гравитационных аномалий. Визуализация геофизических полей является важным инструментом

моделирования сложных физических и геологических процессов, проходящих в околоземном пространстве, на поверхности и в толще Земли (рис. 1).

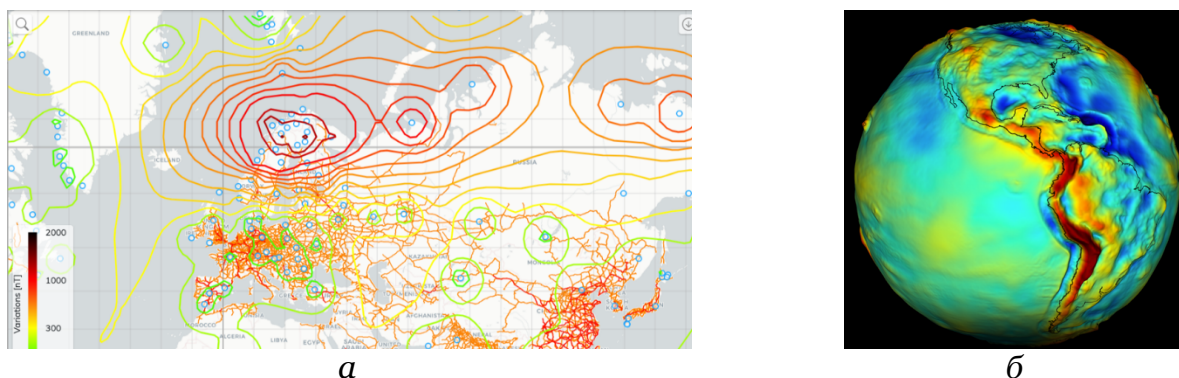
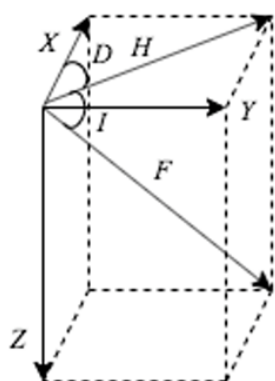


Рис. 1 – Примеры визуализации геофизических полей: *а* – геомагнитное поле в виде системы пространственных изолиний [1], *б* – гравитационное поле в проекте GRACE

Сложный комплексный характер параметров геофизических полей определяется во многом тем, что в каждой пространственной точке соответствующее поле задается одним или несколькими векторами (двумерными векторами или многомерными тензорами), каждый из которых, в свою очередь, характеризуется комплексом параметров. Так, к примеру, геомагнитное поле в каждой точке земного пространства определяется как вектор, который, в свою очередь, задается множеством параметров, характеризуется собственным градиентом и в общем случае может быть охарактеризован как тензор второго порядка. В общем виде параметрический состав вектора геомагнитного поля представлен так, как показано на рис. 2, и характеризуется следующими основными параметрами [1]:

- северный X , восточный Y и вертикальный Z компоненты,
- полный вектор F , склонение D и наклонение I ,
- горизонтальный H и вертикальный компоненты Z , склонение D .



$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2},$$

$$H = F \times \cos I, \quad Z = F \times \sin I,$$

$$X = H \times \cos D, \quad Y = H \times \sin D.$$

Рис. 2 – Схема взаимосвязи параметров вектора геомагнитного поля

Проведенный анализ известных решений по визуализации геофизических полей показал, что в подавляющем большинстве случаев имеет место упрощение имеющихся данных посредством разделения их представления на отдельные пространственные слои. Каждый пространственный слой соответствует одному параметру соответствующего вектора или тензора, при этом окончательное пространственное изображение формируется с помощью известных методов интерполяции (шагающих квадратов, развертки и пр.) в зависимости от возможностей применяемых для этого геоинформаци-

онных технологий. Подобный подход сопряжен с потерей комплексной интерактивности решения, что обусловлено, в первую очередь, тем, что для пользователя становится невозможна или излишне затруднена визуализация одновременно многих или всех параметров вектора или тензора геофизического поля, что, в свою очередь, приводит и к потере информативности геопространственного изображения, сложности его ретроспективного анализа. Кроме того, здесь представляется важным отметить, что многослойное геопространственное изображение не лишено визуальных артефактов, обусловленных перегруженностью представления (в частности, во многих решениях можно наблюдать перекрывание или наложение пространственных слоев, что не позволяет идентифицировать некоторый конкретный параметр визуально и оценить его в контексте анизотропии остальных анализируемых параметров вектора / тензора геофизического поля).

С учетом сказанного возникает актуальная научно-техническая задача визуализации векторов и тензоров геофизических полей таким образом, чтобы обеспечить возможность их единовременного комплексного представления независимо от количества анализируемых параметров в виде интегрированного пространственного слоя. Представляется целесообразным разработать и формализовать такой способ визуализации геопространственного изображения, который позволит описать векторную и / или тензорную природу поля с учетом вариаций значений атрибутивных параметров применительно к различным осям (направлениям) геофизических значений в контексте их градиента. Решение предлагается реализовать в виде веб-ориентированного сервиса или приложения для обеспечения возможности его широкого распространения и применения как конечными пользователями с помощью стандартных веб-браузеров, так и сторонними приложениями с помощью сервисов API, функционирующих по стандартным веб-протоколам взаимодействия.

2. Состояние вопроса

Современные программные решения в целом и геоинформационные решения в частности, ориентированные на визуализацию многокомпонентных векторных и тензорных геофизических полей, основаны преимущественно на применении специализированных цветовых решений в геопространственных изображениях, с одной стороны, а также использовании различных условных изображений для представления анализируемых параметров, с другой. Примером тому являются различные тепловые карты, использующие варьирование цветовой схемы для характеристики вариабельности отдельно взятого параметра / компонента вектора геофизического поля. В качестве еще одного примера можно привести решение, использующее стрелочные пиктограммы для отображения направления градиента геомагнитного поля в разрезе отдельно взятого компонента его вектора (рис. 3).

В случае анализа и визуальной интерпретации единственного параметра геофизического поля каждый из представленных вариантов является достаточно информативным. Однако при переходе к анализу комплекса параметров соответствующего поля применение указанного подхода может быть сопряжено со значительными сложностями в интерпретации итогового пространственного изображения. Так, в каждой пространственной точке при комплексном анализе задаются множественные (зачастую разнонаправленные) вектора (пиктограммы векторов), которые перекрывают друг друга и вызывают значительную перегруженность формируемого геопространственного изображения. В случае высокой плотности визуализируемых пространственных данных ситуация еще более усугубляется.

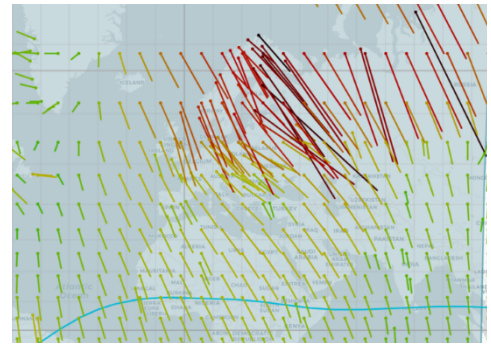
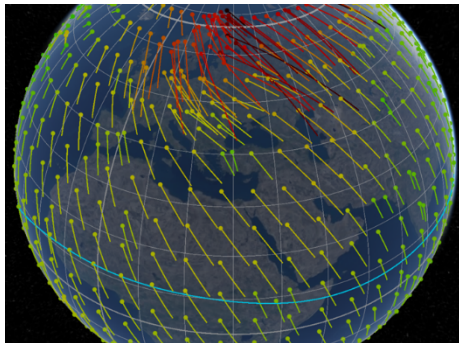


Рис. 3 – Визуализация компонент вектора геомагнитного поля с использованием стрелочных пиктограмм на плоских картах (двумерное представление) и виртуальном глобусе (трехмерное представление) [1]

Фактически рассматриваемые известные подходы предполагают упрощенное представление геофизических полей посредством сведения соответствующих векторов / тензоров к их скалярным компонентам с формированием соответствующих пространственных слоев (поверхностей). При этом в любом случае происходит потеря значимой информации, необходимой для понимания исследуемого процесса / явления информации, поскольку в подавляющем большинстве случаев требуется информация о полном векторе в совокупности его компонент.

Для визуализации геофизических полей в некоторых случаях применяются решения, используемые для визуализации данных в смежных научных и прикладных областях (Рис. 4). Так, к примеру, известен подход к визуализации векторного поля, который эффективно визуализирует паттерны движения частиц и обеспечивает за счет этого более интуитивное представление поля в целом (Рис. 4, а) [2]. Рассматриваемый подход использует так называемые вектора движения (travel vectors), которые позволяют, с одной стороны, выявить точки с наивысшей интенсивностью движения, а также улучшить представление о состоянии движения анализируемых объектов, с другой. В качестве недостатков при этом можно отметить, что применение метода ограничено из-за высокой вычислительной нагрузки при обработке и рендеринге большого количества точек, что может привести к задержкам в отображении и снижению производительности. Кроме того, при использовании векторов движения существует риск искажения данных или потери важной информации из-за упрощения более сложных траекторий, что может повлиять на точность анализа и интерпретации динамики движения.

Здесь же представляется целесообразным рассмотреть известный подход [3], обеспечивающий визуализацию поля как результат комбинирования векторного и тензорного полей для представления глобальных и локальных особенностей соответствующих параметров (Рис. 4, б). В общем виде результат визуализации согласно рассматриваемому подходу представлен совокупностью двух компонент: фоновая визуализация для отображения крупных тенденций и локальная визуализация для выделения значительных характеристик. При этом в контексте формализации обозначенный метод включает в себя разложение соответствующего тензора на изотропное масштабирование, сдвиг и вращение, для отображения которых для локальной визуализации используются специальные пиктограммы. Преимущества обозначенного подхода заключаются в его универсальности (возможно таким образом визуализировать различные поля, не только геофизические), а также возможности комплексной визуализации (используются несколько компонентов, такие как масштабирование, сдвиг и вращение, что положительно сказывается на качестве последующей интерпретации результатов). Среди недостатков решения можно обозначить высокую вычислительную нагрузку, связанную с реализацией процедуры разложения тензора и последующей кластеризации, а также возможные потери данных, что связано с упрощенной визуализацией, ос-

нованной, по сути, на использовании однообразных пиктограмм, это может привести к потере важных деталей, особенно в сложных датасетах.

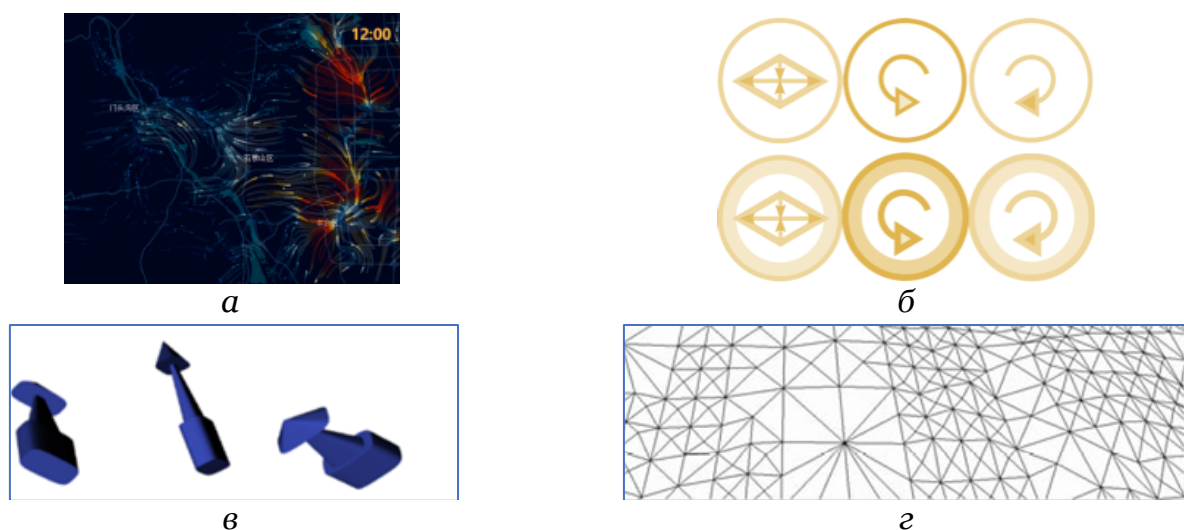


Рис. 4 – Примеры известных подходов к визуализации полей

В работе [4] представлен метод визуализации неопределенности трехмерных векторных полей с использованием трехмерных глифов. В решении предлагается применение специализированного «кальмарообразного» глифа (squid glyph), который в общем случае эффективно визуализирует неопределенности полей как по величине, так и по направлению, улучшая интерпретируемость итогового изображения (Рис. 4, в). Кроме того, вводится дополнительный параметр – метрика глубины вектора, что позволяет анализировать распределение векторов внутри соответствующего набора данных без предварительного анализа, что улучшает понимание структуры визуализируемых данных в целом. Вместе с тем рассматриваемый метод визуализации сопряжен с высокой вычислительной нагрузкой при программной реализации по причине большого количества используемых параметров и сложности результирующего глифа.

Представляет интерес метод [5], обеспечивающий при реализации детальную визуализацию гравитационного поля Земли с использованием квадратичной сетки с множеством узлов. Рассматриваемый метод характеризуется возможностью реализации регулируемой детализации результирующего изображения, что в целом позволяет достаточно подробно отобразить потоки в гравитационном поле (Рис. 4, г). Формируемая при этом трехмерная сетка проста в интерпретации и достаточно наглядно показывает возникающие изменения и /или аномалии в поле, которые выражаются ее колебанием. Среди недостатков возможно отметить высокую вычислительную сложность метода. Так, если изначально заложить слишком высокое значение для параметров детализации изображения, то количество узлов для последующего рендера значительно возрастает, увеличивая нагрузку на аппаратную мощность. Кроме того, с помощью представленного метода не получится учитывать большое количество атрибутивных параметров, поскольку у используемого графического примитива количество свойств ограничено и не очень велико.

В общем и целом на основании анализа известных решений для визуализации различных полей (не только геофизических), представляется возможным заключить, что всем рассмотренным моделям и методам свойственны такие недостатки как высокая вычислительная сложность, невозможность комплексной визуализации атрибутивных параметров, а также в подавляющем большинстве случаев не учитывается геопространственная привязка данных, что не позволяет визуализировать итоговое изображение на картографической подложке и существенно усложняет визуальную интерпретацию результата конечным пользователем.

3. Характеристика исходных данных

Для более наглядного представления предлагаемого решения по визуализации геофизических полей представляется целесообразным предварительно представить характеристику соответствующих данных. В качестве примера рассмотрим геомагнитные данные, являющиеся результатом непрерывной регистрации параметров магнитного поля Земли и его вариаций наземными (магнитные обсерватории и вариационные станции) и околоземными (спутники) информационно-измерительными системами. Регистрируемые геомагнитные данные проходят многоступенчатую обработку и размещаются для последующего хранения и применения конечными пользователями на специализированных веб-ресурсах с открытым доступом. Таковым является, к примеру, используемый в качестве основного в настоящей работе проект SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/>), обеспечивающий доступ к годовым архивам геомагнитных наблюдений более 300 наземных магнитных обсерваторий и вариационных станций [6-7].

Геомагнитные данные представляют собой характеристику магнитного поля Земли, генерируемого внутриземными источниками [8]. При этом в каждой пространственной точке геомагнитное поле может быть задано полным вектором напряженности, т.е. направлением действия и соответствующим модулем [8]. Геомагнитное поле является примером тензорного поля, определяемого в общем случае как некоторая описываемая заданной функцией поверхность, каждой точке которой ставится в соответствие тензор, привязанный к соответствующей системе координат и имеющий начало в заданной пространственной точке. В общем случае тензор геомагнитного поля при этом может быть задан как некоторая исходная точка с совокупностью характеризующих его векторов, исходящих из данной точки. Вектор геомагнитного поля, разделенный на составляющие его компоненты, на уровне соответствующего тензора может быть представлен совокупностью скалярных значений, каждое из которых, в свою очередь, можно представить, к примеру, отдельным пространственным слоем.

Если рассматривать геомагнитный градиент G , который характеризует скорость изменения параметров геомагнитного вектора по трем направлениям (соответственно x , y и z) в декартовой системе координат, то его тензор может быть представлен следующим образом [9]:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_x}{\partial y} & \frac{\partial F_x}{\partial z} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial y} & \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ \frac{\partial F_z}{\partial x} & \frac{\partial F_z}{\partial y} & \frac{\partial F_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где F_x , F_y и F_z – три компонента вектора геомагнитного поля в своих проекциях на соответствующие оси x , y и z .

Или для большей наглядности в виде свертки:

$$G = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

На основании приведенных соотношений (1) и (2) можно сделать вывод о том, что градиент геомагнитного поля представляет собой тензор второго ранга, который при этом состоит из $3 \times 3 = 9$ соответствующих пространственных производных [8]. При этом поскольку дивергенция и вращение геомагнитного поля равны нулю, то

$$g_{xx} + g_{yy} + g_{zz} = 0; \quad (3)$$

$$g_{xy} = g_{yx}, g_{xz} = g_{zx}, g_{yz} = g_{zy}.$$

Тогда с учетом (3) тензор из выражения (2) можно представить как симметричную матрицу размером 3×3 , в которой выделены пять независимых компонентов, обозна-

ченных соответственно, как g_{xx} , g_{yy} , g_{xy} , g_{yz} и g_{zx} [8]. При этом в соответствии с уравнениями Лапласа сумма размещенных по диагонали матрицы элементов равна нулю [8].

Получаемый в результате тензор геомагнитного поля является прямоугольным, при чем длина каждой из осей тензора (форма тензора) равна 3, количество осей (ранг тензора) также равен 3, общее количество элементов в тензоре (размер тензора) соответственно составляет 9.

В каждой пространственной точке геомагнитное поле задается соответствующей диадой (тензором второго ранга). Если при этом рассматривать, к примеру, пару соседних пространственных точек A и B , то возможно получить новый тензор так же второго ранга, полученный алгебраическим суммированием каждого компонента тензора одного слагаемого с соответствующим компонентом тензора другого слагаемого [8]:

$$G_A = \begin{bmatrix} g_{xx_A} & g_{xy_A} & g_{xz_A} \\ g_{yx_A} & g_{yy_A} & g_{yz_A} \\ g_{zx_A} & g_{zy_A} & g_{zz_A} \end{bmatrix}, \quad G_B = \begin{bmatrix} g_{xx_B} & g_{xy_B} & g_{xz_B} \\ g_{yx_B} & g_{yy_B} & g_{yz_B} \\ g_{zx_B} & g_{zy_B} & g_{zz_B} \end{bmatrix},$$

$$G_{AB} = \begin{bmatrix} g_{xx_A} + g_{xx_B} & g_{xy_A} + g_{xy_B} & g_{xz_A} + g_{xz_B} \\ g_{yx_A} + g_{yx_B} & g_{yy_A} + g_{yy_B} & g_{yz_A} + g_{yz_B} \\ g_{zx_A} + g_{zx_B} & g_{zy_A} + g_{zy_B} & g_{zz_A} + g_{zz_B} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

4. Описание предлагаемого подхода

Основной целью описываемого в данной статье исследования является повышение информативности визуального представления тензорных полей в геоинформационных системах таким образом, чтобы интегрировать множество скалярных составляющих тензора в единый графический объект с учетом позиции соответствующего параметра в общей характеристике поля. Сформированное геопространственное изображение должно обеспечить конечному пользователю возможность единовременного отображения всех параметров тензорного поля с соблюдением направленности составляющих его векторов и сохранением всей сопутствующей информации.

Суть предлагаемого подхода заключается в представлении тензора в виде геопространственного примитива, форма которого характеризует ранг и форму визуализируемого тензора. Проведенный анализ возможных вариантов графического представления позволил выделить глиф (glyph) как основной графический примитив, который в настоящее время используется для решения прикладных и научно-исследовательских задач для отображения комплексных данных с учетом их характерных особенностей (формы, размера, ориентации), определяющих внешний вид и расположение базового графического примитива на картографической подложке [10-11].

В контексте возможного представления глифа представляется целесообразным отметить такие формы, как эллипсоид, кубоид, цилиндрический глиф, а также суперквадрикс. При этом при выборе базовой формы глифа необходимо учитывать количество составляющих визуализируемый тензор осей (ранг тензора) [12]. Предлагается в качестве такого геопространственного примитива для отображения геофизических тензорных полей использовать глифы-эллипсоиды, а с учетом сложности вектора / тензора геомагнитного поля представляется целесообразным расширить выбранную форму глифа и представить компоненты поля в виде суперэллипса, задаваемого совокупностью кривых Ламе.

Для реализации предлагаемого решения в центроиде суперэллипса предлагается разместить исходящие из него оси, каждая из которых соответствует отдельной составляющей визуализируемого тензора (в случае геомагнитного поля в качестве таковых рассматриваются компоненты вектора магнитного поля Земли). Варьируя длину и цвет каждой составляющей суперэллипса возможно управлять представлением соответствующего компонента тензорного поля (например, геомагнитного или гравитационного). Так, в частности, в контексте управления цветовой схемой суперэллипсов возможно использовать монохромное представление значений по каждой виртуальной

оси глифа. Соответствующая цветовая маска формируется предварительно так, чтобы в зависимости от величины визуализируемого параметра итоговый цвет был представлен в виде соответствующего градиента с шириной, определяемой размерами глифа и количеством предусмотренных в нем осей. В результате интенсивность градиента по каждой из осей тензорного глифа в составе единой фигуры позволит визуально оценить их распределение с учетом аналогичных геопространственных изображений в соседних пространственных точках.

Управление цветовой схемой суперэллипса позволяет избежать использования дополнительных изображений (например, громоздких стрелочных пиктограмм) для описания векторных составляющих соответствующего поля. В результате итоговое геопространственное изображение будет характеризоваться интенсивностью соответствующих цветовых решений, обеспечивая информативное представление различных (разнонаправленных в том числе) компонент геофизического поля (к примеру, различных составляющих полного вектора геомагнитного поля).

С каждой пространственной точкой ассоциируется собственный суперэллипс, центроид которого координатно совпадает с соответствующей геопространственной точкой и задается парой географических координат. В результате формируемое геопространственное изображение представляет собой совокупность многих суперэллипсов, привязанных к точкам пространства и имеющих свои цветовые и геометрические характеристики.

В общем случае формула суперэллипса, построенного на базе n пространственных осей, может быть представлена следующим образом [13-14]:

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

где коэффициенты a и b определяют соответственно сжатость суперэллипса вдоль осей координат.

Здесь представляется важным отметить, что чем большее количество осей представлено в суперэллипсе, тем больше его форма стремится к прямоугольной. Так, например, если используется единственная ось, то суперэллипс представляет собой плоский ромб с вершинами на осях координат. Если рассматриваются две оси, то результатом визуализации является соответственно эллипс (в случае, если $a = b$, то эллипс преобразуется в окружность) [15].

Однако даже если в первом приближении визуализация суперэллипса стремится к форме прямоугольника, то составляющие его отрезки все равно представляют собой кривые (отрезки соединяют все точки, образованные на пересечении с соответствующими осями суперэллипса), т.е. фактически все сегменты суперэллипса всегда немного изогнуты [15]. При этом кривизна линий суперэллипса повсюду меняется в целом непрерывно.

В общем виде процесс построения суперэллипса приведен на Рис. 5, где визуализация компонент тензора показана на примере геомагнитного поля. На первом шаге соответствующей методики для построения суперэллипса в первом приближении необходимо определить количество исходящих из его центроида осей. Количество осей должно быть пропорционально числу составляющих визуализируемый тензор компонент. Так, к примеру, для геомагнитного поля с рангом 2 количество осей в суперэллипсе кратно трем.

При этом важно отметить, что в случае, если значения отображаемых компонент тензора могут быть отрицательными (как, в частности, имеет место в случае компонент вектора геомагнитного поля), то соответствующая ось должна быть продублирована относительно центроида суперэллипса и повернута при этом в пространстве на 180° . Соответственно количество осей суперэллипса возрастает вдвое и, к примеру, для магнитного поля Земли составит три пары или шесть соответствующих осей, исходящих из одной точки – центроида суперэллипса. Особенности всех известных видов геофизических полей таковы, что при построении соответствующих суперэллипсов необходи-

мо рассматривать противоположные оси (положительную и отрицательную оси), ассоциированные с отдельными компонентами полного вектора рассматриваемого параметра (например, полного вектора геомагнитного поля).

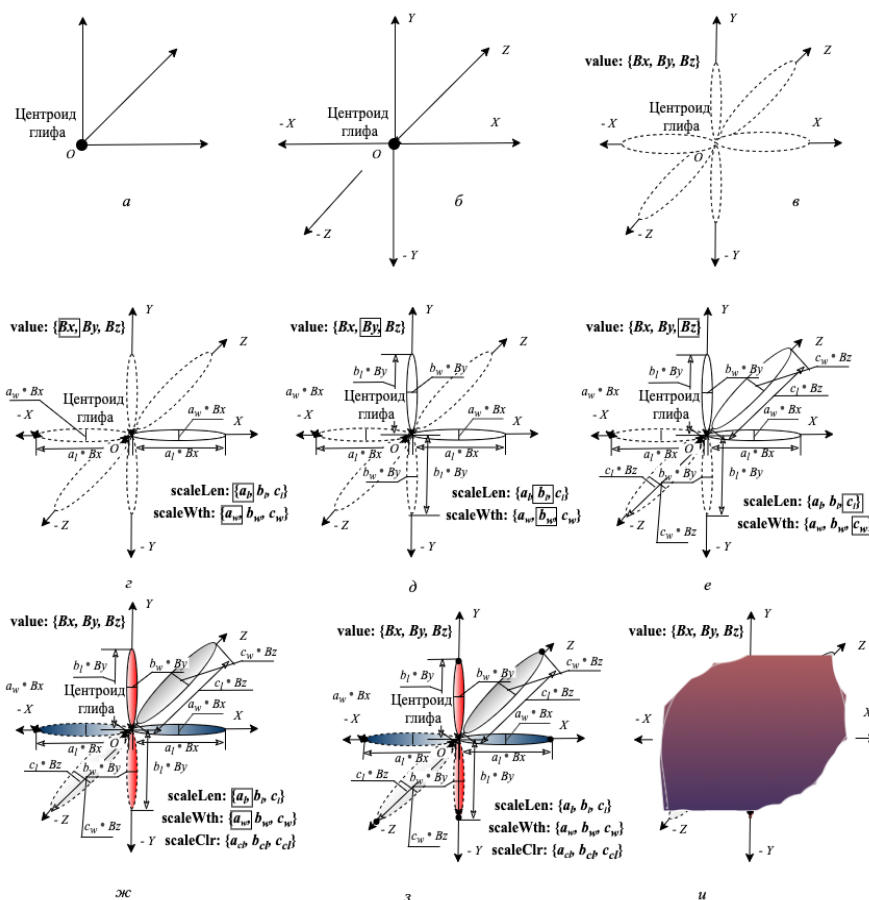


Рис. 5 – Последовательность этапов формирования тензорного глифа на базе суперэллипса на примере геомагнитного поля и его полного вектора с заданными составляющими

На последующем шаге определяются коэффициенты масштабирования значений компонент вектора геофизического поля применительно к визуализации составляющей суперэллипса. При этом предполагается, что по каждой отдельной оси должен быть построен собственный правильный эллипс, ширина и длина которого определяются соответствующими значениями атрибутивного параметра, с одной стороны, и коэффициентом масштабирования, с другой. Овальные глифы в зависимости от домена соответствующего атрибутивного параметра тензора геофизического поля размещаются в положительном и / или отрицательном направлении относительно выбранной оси суперэллипса. Фактически в предфинальном изображении глифа формируется сложная фигура, составленная множеством правильных эллипсов, вытянутых / сжатых относительно соответствующих осей во всех возможных направлениях.

На последующем шаге каждому обозначенному овалу внутри соответствующей оси / полуоси финального тензорного глифа ставится в соответствие собственная цветовая схема. Представляется целесообразным для каждой такой фигуры определить монохромное представление с направлением градиента цвета и величины по мере изменения соответствующего визуализируемого значения. Для одной и той же оси задается градиент одного и того же типа с противоположными градациями для различных полуосей (или с одной в случае единственной полуоси).

На последнем этапе определяются точки пересечения овальных примитивов друг с другом и осями / полуосями суперэллипса (предварительно). Обозначенные точки

здесь и далее предлагается называть опорными точками суперэллипса. Кривые Ламе последовательно соединяют выделенные опорные точки, цветовые схемы проходят дополнительно преобразование для сглаживания четких границ между имеющимися овалами. Полученная фигура и будет представлять собой суперэллипс – тензорный глиф геофизического поля.

5. Апробация решения и оценка его эффективности

Для подтверждения работоспособности и оценки эффективности предложенного решения был разработан исследовательский прототип веб-ориентированного приложения, обеспечивающего визуализацию параметров главного геомагнитного поля. В качестве исходных данных были использованы результаты расчета параметров невозмущенного магнитного поля Земли в соответствии с моделью World Magnetic Model (WMM); при этом в качестве основных были выделены три составляющие полного вектора магнитного поля (северный, восточный и вертикальный составляющие) [16-17].

Программная реализация исследовательского прототипа веб-ориентированного приложения была выполнена на основе Python 3.9+ с использованием специализированных библиотек научных вычислений (NumPy, SciPy) и визуализации (Matplotlib, VTK), что обеспечило точное аналитическое задание суперэллипсов через параметризацию кривых Ламе с адаптивным масштабированием коэффициентов в соответствии с величиной компонент тензорного поля. Предложенное решение по визуализации поддерживает как 2D-режим (Matplotlib), так и 3D-реализацию (VTK) с текстурированием глифов, при этом цветовое кодирование компонент выполнено через линейные градиенты LinearSegmentedColormap (Matplotlib) с нормировкой данных. Разработанное программное решение может быть преобразовано в формат API, что позволит интегрировать его в современные ГИС-платформы для анализа многокомпонентных геофизических полей.

Расчет и визуализация параметров геомагнитного поля были выполнены на земной поверхности по равномерной пространственной сетке с шагом дискретизации в 1° . Для каждой точки с учетом вычисленных значений компонент вектора магнитного поля был рассчитан соответствующий градиент, характеризующий направление роста анализируемых величин. Полученные значения для последующей обработки были оформлены в тензор второго порядка [18-19].

Визуализация рассчитанных значений была выполнена посредством формирования пространственного слоя, состоящего из тензорных глифов с привязкой к соответствующим географическим координатам. Каждому компоненту вектора (градиенту соответствующего компонента) поля поставлен в соответствие свой тензорный глиф в пространственной точке-узле сети мониторинга. Для повышения информативности были введены цветовые схемы (были использованы монохромные представления для каждой отдельной составляющей вектора геомагнитного поля) [20].

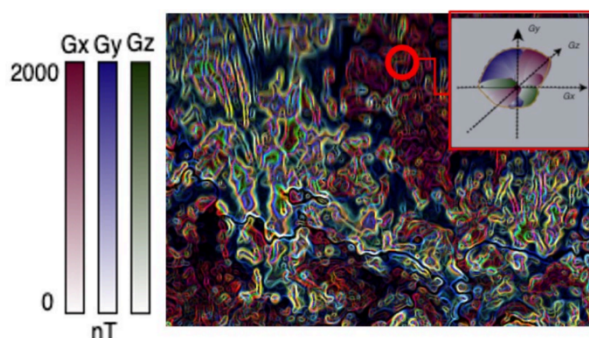


Рис. 6 – Пример фрагмента экранной формы с тензорными глифами для представления геомагнитного поля

В результате проведенных вычислительных операций был сформирован пространственный слой, визуализированный на плоской картографической подложке. Слой в общем виде позволяет судить о характере пространственного распределения параметров геомагнитного поля и его вариаций с учетом градиентов соответствующих параметров, что в дальнейшем может быть использовано профильными специалистами для оценки геомагнитной обстановки в процессе принятия решений на основе указанной информации в прикладных и научно-исследовательских областях.

Для оценки эффективности представленного решения была проведена серия вычислительных экспериментов, направленных на сравнение результатов предлагаемого решения и известных подходов по некоторым качественным и количественным критериям. При проведении вычислительных экспериментов был использован клиент-серверный стенд со следующими характеристиками: на клиентской стороне с применением ЭВМ (CPU Intel Core i5 10300H ГГц, оперативная память 4 ГБ, скорость интернет-соединения ~52.4 Мбит/с); на серверной стороне – на базе веб-сервера с процессором 72 * Intel(R) Xeon(R) Gold 6140 CPU @ 2.30GHz.

В контексте качественных критериев оценки в ходе проведенных экспериментов было установлено, что предлагаемое решение позволяет представить всю анализируемую группу параметров геофизического поля единым слоем, к которому применимы интегральные инструментальные и программные средства по обработке и визуализации данных с использованием геоинформационных библиотек и технологий. В частности, для единого пространственного слоя возможно использование элемента покадрового переключения слоев с последовательными временными метками для оценки пространственно-временной динамики распределения параметров соответствующего процесса или явления (в рассматриваемом случае имеется в виду геомагнитное поле). Иные подходы к визуализации предполагают создание отдельного пространственного слоя для каждого анализируемого параметра, что исключает возможность оперирования ими как единым целым. Кроме того, при таком многослойном подходе возможны значительные перекрытия пространственных изображений, также существенно затрудняющие их визуальный анализ. Предлагаемое решение за счет комбинирования осей тензорного глифа в заданной пространственной точке позволяет в целом избежать или существенно сократить (для большого количества пространственных точек) такое нагромождение пространственных графических примитивов.

Количественные критерии оценки результативности предложенного решения в общем случае были сведены к анализу производительности его веб-реализации как на клиентской, так и на серверной стороне. В качестве образца был использован разработанный веб-ориентированный прототип геоинформационной системы, в котором был непосредственно реализован предложенный подход к визуализации на основе тензорных глифов. Для оценки производительности были выбраны следующие критерии:

- время отклика, мс. Данный критерий характеризует количество времени ожидания пользователем ответа от сервера (от момента отправки запроса до получения результатов в том или ином формате);

- TTFB (время до получения первого байта информации с сервера, Time to first byte), мс;

- FCP (первая отрисовка контента, First Contentful Paint), с. Данный критерий характеризует время, которое затрачивается от момента отправки запроса на сервер до момента, когда браузер отображает первый бит контента из DOM-дерева соответствующей страницы;

- LCP (отрисовка самого крупного контента, Largest Contentful Paint), с. Данная метрика характеризует время, необходимое для завершения рендеринга в браузере самого крупного визуального элемента. В рассматриваемом примере в качестве такового представляется целесообразным рассмотреть прорисовку пространственного слоя с тензорными глифами на соответствующей картографической подложке;

– FID (First Input Delay), мс. Данная метрика позволяет оценить время, которое необходимо для того, чтобы пользователь смог взаимодействовать с веб-приложением с использованием соответствующих интерактивных элементов. В рассматриваемом случае представляется целесообразным измерить данный показатель с точки зрения возможности масштабирования прорисованного пространственного изображения с тензорными глифами с использованием соответствующих интерфейсных элементов.

Серия вычислительных экспериментов была проведена для геомагнитных данных и их градиентов, рассчитанных для различных временных периодов. В целом было сформировано более 300 различных пространственных слоев, в процессе создания и визуализации которых были соответственно измерены заявленные выше характеристики веб-приложения. Задача проведения обозначенных экспериментов сводилась к тому, чтобы показать, что введение предлагаемого решения в веб-ориентированную геоинформационную систему не снизит ее производительности как высокореактивного веб-приложения. Так, были получены следующие значения обозначенных количественных метрик качества: время отклика = 298 мс; TTFB = 289 мс; FCP = 1.65 с; LCP = 2.34 с; FID = 98 мс. Приведенные значения свидетельствуют о том, что итоговое веб-приложение не теряет своих показателей производительности, с одной стороны, и является высокореактивным, с другой.

6. Перспективы применения предложенного подхода

Предложенный в настоящей работе метод визуализации тензорных геофизических полей посредством специализированных глифов-суперэллипсов в общем виде позволяет решить одну из ключевых проблем анализа сложноструктурированных геофизических данных. Обозначенная проблема часто проявляется при обработке данных и обусловлена перегруженностью их интерпретации при одновременной работе с множеством скалярных и векторных параметров.

Повторно отметим, что использование традиционных методов визуализации в контексте обозначенной проблемы основано на раздельном отображении скалярных и векторных компонент, что в совокупности приводит к потере корреляционных связей между параметрами, перегруженности графического пространства при наложении пространственных слоев, а также различного рода субъективным ошибкам при сопоставлении разнородных данных. Предлагаемый подход позволяет избежать проявления перечисленных ошибок за счет тензорно-адаптивной геометрии и полихроматического кодирования суперэллипсов, обеспечивая целостное восприятие соответствующих пространственных закономерностей.

Суперэллиптические глифы позволяют сохранить при визуализации данных инварианты тензора (след, детерминант, анизотропию и пр.), что критично для анализа соответствующей информации в различных областях. Так, к примеру, использование суперэллипсов позволяет выделить пространственные зоны с высокой дивергенцией геомагнитного поля с геомагнитными аномалиями, что в общем виде представлено на карте распределения параметров геомагнитного поля (рис. 6, 7). Так, на основе представленного на экранной форме результата визуализации можно сделать вывод о выраженном высокоширотном распределении геомагнитных вариаций и аномалий по всем компонентам соответствующего вектора.

Аналогичным образом предложенный в работе гравитационный градиент может быть использован для отражения локальных вариаций плотности посредством формы глифа. Например, в магниторазведке при таком подходе эллиптичность глифа коррелирует с коэффициентом анизотропии магнитной восприимчивости, а ориентация осей соответствует направлению намагниченности.

В общем виде могут быть сформулированы следующие направления практического применения предложенного решения:

– единое представление многокомпонентных данных: пользователю нет необходимости сопоставлять разрозненные графики или стрелочные диаграммы, поскольку все компонент соответствующего тензора (к примеру, геомагнитного поля) интегрированы в один интуитивно понятный объект. Пользователю в результате доступны не три отдельных вектора, а единый суперэллипс, в котором длина, цвет и кривизна осей отражают соотношение компонент и их направленность.

– сохранение контекста пространственных связей: варьирование цветового градиента и формы глифа демонстрирует изменение не только абсолютных значений соответствующих параметров, но и их распределение относительно соседних точек / регионов. Например, пользователю на карте геомагнитных аномалий использование градиента позволяет визуально определить зону с максимальными отклонениями, при этом изогнутость соответствующих контуров указывает на наличие нелинейных эффектов пространственного распределения;

– сокращение временных затрат на анализ: автоматическое масштабирование осей и сглаживание соответствующих цветовых переходов градиента позволяет пользователю сфокусироваться непосредственно на интерпретации данных и не применять ручную настройку визуализации для каждого параметра.

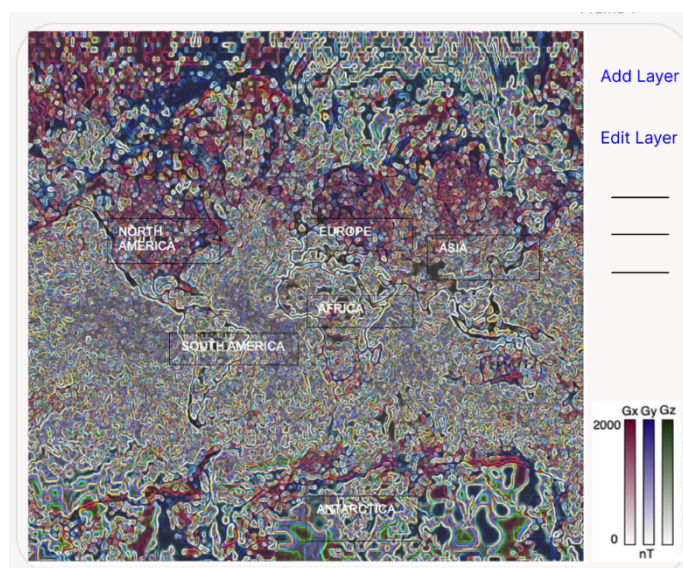


Рис. 7 – Экранная форма с результатом визуализации геомагнитных аномалий

Резюмируя, представляется целесообразным отметить, что предложенный подход позволяет преобразовать абстрактные тензорные данные в выразительный с точки зрения геометрии и цвета объекты, которые, в свою очередь, сокращают когнитивную нагрузку на пользователя при работе с многомерными геофизическими полями, позволяют выявлять паттерны и аномалии более наглядно, чем известные методы, а также могут быть интегрированы в стандартные ГИС-интерфейсы без необходимости освоения более сложных инструментов. При этом для практиков (геофизиков, геологов, экологов и пр.) это означает возможность принимать более быстрые и точные решения, например, в поиске полезных ископаемых, мониторинге природных рисков или анализе климатических данных.

7. Заключение

Одним из основных инструментов оперативного анализа геофизических полей в настоящее время является их визуализация на картографической подложке с использованием соответствующих геоинформационных программных и инструментальных средств и систем. Вместе с тем комплексный многокомпонентный состав анализируемых полей в каждой пространственной точке существенно затрудня-

ет такой анализ в интегрированном формате. Кроме того, ряд геоинформационных инструментальных и программных средств ориентирован на работу с единым пространственным слоем, что в контексте известных решений технически невозможно.

В этой связи в настоящей статье авторами предложен и формализован подход к визуализации векторных и тензорных геофизических полей на основе тензорных глифов в составе интегрированного пространственного слоя. В качестве основного геопространственного примитива предложено использование суперэллипса, оси которого соответствуют рангу визуализируемого тензора, а атрибутивные значения выражаются величинами соответствующих эллипсов, вытянутых или сжатых относительно соответствующих осей с заданными коэффициентами масштабирования.

На примере значений параметров главного геомагнитного поля, рассчитанных в соответствии с моделью WMM, был разработан исследовательский прототип веб-приложения, реализующего предложенный подход к визуализации геофизических полей. Сравнение с иными решениями визуализации аналогичных параметров показало качественное преимущество использования предлагаемого подхода, заключающееся в том, что становится возможным представление комплекса параметров в составе единого программно управляемого пространственного слоя.

Анализ количественных характеристик приведенного решения был проведен в соответствии с метриками оценки производительности веб-приложения и был ориентирован преимущественно на оценку времени получения отклика от сервера и завершение процедуры рендеринга геопространственного изображения на его основе. Проведенные на исследовательском стенде вычислительные эксперименты показали, что параметры производительности веб-приложения, реализующего предложенное решение, не вызывают негативного отклика с позиций его производительности.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-77-30010-П).

Список литературы

1. Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Еникеев Т. А., Воробьева Г. Р., Христодуло О.И.. Система динамической визуализации геомагнитных возмущений по данным наземных магнитных станций // Научная визуализация. 2021. № 13.1. С. 162–176, DOI: 10.26583/sv.13.1.11
2. Li A., Xu Z., Zhang J., Li T., Cheng X., Hu C. A Vector Field Visualization Method for Trajectory Big Data. ISPRS Int. J. Geo-Inf. **2023**, 12, 398. <https://doi.org/10.3390/ijgi12100398>
3. Auer C., Kasten J., Kratz A., Zhang E., Hotz I. Automatic, tensor-guided illustrative vector field visualization // IEEE Pacific Visualization Symposium. 2013. P. 265-272. 10.1109/PacificVis.2013.6596154.
4. Ouermi T., Li J., Morrow Z., Waanders B., Johnson Ch. Glyph-Based Uncertainty Visualization and Analysis of Time-Varying Vector Fields, 2024. 10.48550/arXiv.2409.00042.
5. Luo Z., Li Z., Zhong B. Modeling of earth's gravity fields visualization based on Quad Tree // Geo-spat. Inf. Sci. 2020. No. 13. P. 216–220. <https://doi.org/10.1007/s11806-010-0327-5>
6. Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique // J. Geophys. Res., No. 117, 2012, pp. A09213
7. Newell P. T., Gjerloev J. W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // J. Geophys. Res., no. 116, 2011, pp. A12211
8. Воробьева Г. Р., Воробьев А. В., Орлов Г. О. Концепция обработки, анализа и визуализации геофизических данных на основе элементов тензорного исчисления // Информатика и автоматизация. 2024. Вып. 23, т. 2. С. 572–604.

9. Simonyan A., Ohanyan M. Refined Spatio-Temporal Model of Accelerations of the Main Geomagnetic Field on the Earth's Surface and Geomagnetic Jerks // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023. vol. 63. no. 3. pp. 325–348.
10. 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. 119. pp. 337–362. DOI: 10.1007/s10957-023-02287-0.
11. Xia S., Qiu D., Zhang X. Tensor factorization via transformed tensor-tensor product for image alignment // *Numerical Algorithms*. 2023. vol. 22. pp. 1251–1289. DOI: 10.1007/s11075-023-01607-9.
12. Tomasevic D., Peer P., Solina F., Jaklic A., Struc V. Reconstructing Superquadrics from Intensity and Color Images // *Sensors*. 2022. vol. 22(14). no. 5332. DOI: 10.3390/s22145332.
13. Mamieva I. Ruled algebraic surfaces with a main frame from three superellipses // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. vol. 18. no. 4. pp. 387–395. DOI: 10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395.
14. Borisenko V., Ustenko S., Ustenko I. Constructing a method for the geometrical modeling of the lame superellipses in the oblique coordinate systems // *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2020. vol. 2. no. 4. pp. 51–59. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.201760.
15. Olayiwola T., Choi S.-J. Superellipse model: An accurate and easy-to-fit empirical model for photovoltaic panels // *Solar Energy*. 2023. vol. 262. DOI: 10.1016/j.solener.2023.05.026.
16. Chulliat, A., W. Brown, P. Alken, C. Beggan, M. Nair, G. Cox, A. Woods, S. Macmillan, B. Meyer and M. Panizza, The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: Technical Report, National Centers for Environmental Information, NOAA, doi:10.25923/ytk1-yx35, 2025.
17. NOAA NCEI Geomagnetic Modeling Team; British Geological Survey. 2024: World Magnetic Model 2025. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.25921/aqfd-sd83>.
18. 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, 12, 1522. <https://doi.org/10.3390/app12031522>
19. Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis. *Solar-Terrestrial Physics*. 2022. Vol. 8. Iss. 2. P. 84–90. DOI: 10.12737/stp-82202213.
20. Vorobev, A.V., Vorobeva, G.R. Approach to Assessment of the Relative Informational Efficiency of Intermagnet Magnetic Observatories // *Geomagn. Aeron.* 58, 625–628 (2018). <https://doi.org/10.1134/S0016793218050158>.

Glyph-Based Approach to Web Rendering of Geophysical Fields in Geoinformation Systems

G.R. Vorobeva^{1,B}, A.V. Vorobev^{2,A,B}, G.O. Orlov^{3,B}

^A Geophysical Center of the RAS, Moscow, Russia

^B Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

¹ ORCID: 0000-0001-7878-9724, gulnara.vorobeva@gmail.com

² ORCID: 0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

³ ORCID: 0009-0003-5123-3859, orlovgleb99@mail.ru

Abstract

One of the significant problems in visualizing geophysical fields is the inability to simultaneously represent them as an integrated spatial layer, taking into account the complex nature of the parameters being analyzed. Currently, the designated visualization task is solved by decomposing the set of parameters into separate components, followed by rendering spatial layers that are not connected to each other either visually or logically. As a result, information that is important for research or decision-making is lost due to excessive overload of the geospatial image.

The paper proposes an approach to visualizing multicomponent geophysical fields based on graphical primitives called tensor glyphs, which are combined into a single spatial layer to represent several components of the geophysical field. Each individual image is a superellipse, composed of ellipses distributed along the axes and scaled according to the analyzed values, whose intersection points with each other and with the axes provide reference points connected using Lamé curves.

The operability and clarity of the proposed solution are examined using the parameters of the geomagnetic field as an example. Additionally, an analysis of performance metrics for its web implementation is conducted, which allows evaluating the quality of the corresponding solutions.

Keywords: field visualization, geospatial image, tensor field, glyph, superellipse.

References

1. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Enikeev T. A., Vorobeva G. R., Khristodulo O.I. System for dynamic visualization of geomagnetic disturbances according to the data of ground magnetic stations // Scientific Visualization. 2021. No. 13.1. P. 162 - 176, DOI: [10.26583/sv.13.1.11](https://doi.org/10.26583/sv.13.1.11)
2. Li A., Xu Z., Zhang J., Li T., Cheng X., Hu C. A Vector Field Visualization Method for Trajectory Big Data. ISPRS Int. J. Geo-Inf. **2023**, 12, 398. <https://doi.org/10.3390/ijgi12100398>
3. Auer C., Kasten J., Kratz A., Zhang E., Hotz I. Automatic, tensor-guided illustrative vector field visualization // IEEE Pacific Visualization Symposium. 2013. P. 265-272. [10.1109/PacificVis.2013.6596154](https://doi.org/10.1109/PacificVis.2013.6596154).
4. Ouermi T., Li J., Morrow Z., Waanders B., Johnson Ch. Glyph-Based Uncertainty Visualization and Analysis of Time-Varying Vector Fields, 2024. [10.48550/arXiv.2409.00042](https://arxiv.org/abs/2409.00042).
5. Luo Z., Li Z., Zhong B. Modeling of earth's gravity fields visualization based on Quad Tree // Geo-spat. Inf. Sci. 2020. No. 13. P. 216–220. <https://doi.org/10.1007/s11806-010-0327-5>
6. Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique // J. Geophys. Res., No. 117, 2012, pp. A09213

7. Newell P. T., Gjerloev J. W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *J. Geophys. Res.*, no. 116, 2011, pp. A12211
8. Vorobeva G.R., Vorobev A.V., Orlov G.O. Concept of processing, analysis and visualization of geophysical data based on elements of tensor calculus // *Informatics and Automation*. 2024. no. 23, vol. 2. P. 572–604. DOI: doi.org/10.15622/ia.23.2.10
9. Simonyan A., Ohanyan M. Refined Spatio-Temporal Model of Accelerations of the Main Geomagnetic Field on the Earth's Surface and Geomagnetic Jerks // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023. vol. 63. no. 3. pp. 325–348.
10. 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. 119. pp. 337–362. DOI: 10.1007/s10957-023-02287-0.
11. Xia S., Qiu D., Zhang X. Tensor factorization via transformed tensor-tensor product for image alignment // *Numerical Algorithms*. 2023. vol. 22. pp. 1251–1289. DOI: 10.1007/s11075-023-01607-9.
12. Tomasevic D., Peer P., Solina F., Jaklic A., Struc V. Reconstructing Superquadrics from Intensity and Color Images // *Sensors*. 2022. vol. 22(14). no. 5332. DOI: 10.3390/s22145332.
13. Mamieva I. Ruled algebraic surfaces with a main frame from three superellipses // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. vol. 18. no. 4. pp. 387–395. DOI: 10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395.
14. Borisenko V., Ustenko S., Ustenko I. Constructing a method for the geometrical modeling of the lame superellipses in the oblique coordinate systems // *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2020. vol. 2. no. 4. pp. 51–59. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.201760.
15. Olayiwola T., Choi S.-J. Superellipse model: An accurate and easy-to-fit empirical model for photovoltaic panels // *Solar Energy*. 2023. vol. 262. DOI: 10.1016/j.solener.2023.05.026.
16. Chulliat, A., W. Brown, P. Alken, C. Beggan, M. Nair, G. Cox, A. Woods, S. Macmillan, B. Meyer and M. Panizza, The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: Technical Report, National Centers for Environmental Information, NOAA, doi:10.25923/ytk1-yx35, 2025.
17. NOAA NCEI Geomagnetic Modeling Team; British Geological Survey. 2024: World Magnetic Model 2025. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.25921/aqfd-sd83>.
18. 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, 12, 1522. <https://doi.org/10.3390/app12031522>
19. Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis. *Solar-Terrestrial Physics*. 2022. Vol. 8. Iss. 2. P. 84–90. DOI: 10.12737/stp-82202213.
20. Vorobev, A.V., Vorobeva, G.R. Approach to Assessment of the Relative Informational Efficiency of Intermagnet Magnetic Observatories // *Geomagn. Aeron.* 58, 625–628 (2018). <https://doi.org/10.1134/S0016793218050158>.