

Применение вепольного анализа и геостатистики для мониторинга геомагнитного поля в условиях дефицита данных

Э. Ф. Фарваев

В статье рассматривается актуальная проблема обработки данных мониторинга геомагнитного поля в условиях их значительного дефицита, вызванного неравномерным распределением станций наблюдения, внешними возмущениями и артефактами измерений. Предлагается комплексный подход, интегрирующий методы вепольного анализа для идентификации источников неопределенности данных и адаптивные алгоритмы пространственной интерполяции на основе геостатистики. Новизна исследования заключается в разработке кластерно-адаптивного алгоритма, который динамически выбирает оптимальный метод интерполяции (кригинг, триангуляция Делоне) в зависимости от пространственно-временного контекста и геофизических условий. Для устранения артефактов визуализации на сферических поверхностях предложен метод модифицированной триангуляции Клафа–Точера с дублированием точек вдоль главного меридиана, обеспечивающий целостность изолиний. Эффективность подхода подтверждена экспериментально на данных проекта SuperMAG, показав снижение ошибки интерполяции в среднем на 13,3% и полное устранение артефактов визуализации. Разработанное алгоритмическое обеспечение реализовано в виде высокопроизводительного веб-приложения с микросервисной архитектурой, обеспечивающей оперативный доступ к обработанным данным для поддержки принятия решений.

Вепольный анализ; геостатистика; пространственная интерполяция; геомагнитное поле; дефицит данных.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап технологического развития, характеризующийся процессами цифровой трансформации и обострением задач обеспечения технологического суверенитета, предъявляет повышенные требования к системам анализа и обработки пространственных данных. Особую значимость эти задачи приобретают в критически важных областях, связанных с мониторингом состояния окружающей среды и обеспечением безопасности сложных технологических объектов. К числу таких областей относится мониторинг геофизических полей, данные которого являются фундаментальной основой для принятия ответственных решений в энергетике, телекоммуникациях, навигации и на транспорте [Вор17]. На примере геомагнитного поля хорошо видно, как вариации его параметров способны вызывать масштабные негативные последствия: от сбоев в работе спутниковых систем и отказов энергетического оборудования до ускоренной коррозии магистральных трубопроводов. Таким образом, оперативный и достоверный контроль геомагнитной обстановки превращается не в сугубо научную, а в практическую, экономически и стратегически важную задачу.

Однако существующие системы сбора геофизических данных сталкиваются с фундаментальной проблемой, существенно ограничивающей их эффективность, – проблемой дефицита и неполноты исходных данных. Эта проблема носит системный характер и обусловлена целым

комплексом факторов [Вор23b]. Во-первых, измерительные станции, как правило, распределены по поверхности Земли крайне неравномерно, образуя разреженную и нерегулярную сеть наблюдений с огромными «белыми пятнами» над океанами, в полярных регионах и труднодоступных областях [Вор18, Вор19]. Во-вторых, сам процесс измерений подвержен влиянию многочисленных возмущений, как природного, так и техногенного характера. Геомагнитные бури, ионосферные возмущения, промышленные помехи — все это вносит искажения в регистрируемые сигналы и приводит к появлению артефактов и выбросов в данных [Вор13]. В-третьих, неизбежны технические сбои и простои в работе оборудования, ведущие к потере данных за определенные временные периоды. Следствием этого дефицита становится ситуационная неосведомленность лиц, принимающих решения, что в свою очередь повышает риски возникновения техногенных аварий и ведет к значительным экономическим потерям [Вор23с].

Традиционные методы пространственной интерполяции и анализа данных, такие как различные варианты кригинга, сплайны или методы обратных взвешенных расстояний, демонстрируют удовлетворительную эффективность лишь в условиях относительно равномерного и плотного размещения точек наблюдения с минимальным уровнем шумов. Однако их применение в условиях выраженной пространственной анизотропии, вызванной дефицитом данных, и под воздействием сильных внешних возмущений зачастую приводит к значительным ошибкам восстановления. Эти методы, как правило, не учитывают комплексного влияния разнородных факторов неопределенности, а их алгоритмическая жесткость не позволяет адаптироваться к меняющимся условиям наблюдений, что критично для задач оперативного мониторинга в реальном времени. Кроме того, существующие подходы зачастую игнорируют сферическую геометрию Земли, что при интерполяции и визуализации глобальных полей приводит к серьезным искажениям, таким как разрывы изолиний на границах картографических проекций, что снижает достоверность визуального представления информации для конечного пользователя.

Таким образом, возникает острая необходимость в разработке новых адаптивных моделей и методов, способных минимизировать ошибки восстановления данных в условиях их существенной неполноты и зашумленности. Эти методы должны не просто механически интерполировать значения между известными точками, но и учитывать физическую природу моделируемых полей, а также комплекс экзогенных и эндогенных факторов, влияющих на процесс измерений. Для решения этой задачи в данной работе предлагается синтез двух, на первый взгляд, разнородных методологических подходов: вепольного анализа, являющегося частью теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [Пет18], и классической геостатистики. Вепольный анализ применяется здесь не для технического конструирования, а как мощный инструмент системного анализа. Он позволяет формализовать и выявить взаимные влияния и противоречия внутри сложной системы мониторинга, идентифицировать источники вредных воздействий, ведущих к дефициту и искажению данных. Построение вепольных моделей системы геомагнитного мониторинга дает возможность не просто констатировать проблему неполноты данных, но и системно подойти к разработке механизмов ее компенсации.

Таким образом, настоящее исследование направлено на комплексное решение актуальной научно-практической задачи повышения эффективности мониторинга геофизических полей в условиях дефицита данных через разработку и интеграцию новых методов системного анализа, адаптивной интерполяции, коррекции визуализации и их программной реализации.

СИСТЕМНО-ВЕПОЛЬНАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ГЕОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА

Проблема дефицита пространственно-временной информации о параметрах геофизических полей представляет собой вызов для современных систем поддержки принятия решений. Особую актуальность эта проблема приобретает в контексте мониторинга геомагнитного поля, где недостаток или неполнота данных непосредственно влияют на безопасность функционирования сложных техносферных объектов и систем. В труднодоступных регионах

с ограниченной инфраструктурой наблюдений эта проблема усугубляется, создавая зоны повышенного риска для критически важной инфраструктуры.

Системный анализ позволяет рассматривать задачу мониторинга как комплексную систему, включающую информационно-измерительные инструменты, расположенные как на земной поверхности, так и в околоземном пространстве. В случае геомагнитного мониторинга система формируется сетью магнитных обсерваторий с соответствующим оборудованием и персоналом, а также центрами обработки данных, осуществляющими интеграцию и распространение результатов измерений (рис. 1). Ключевой характеристикой такой системы является постоянное присутствие в ее внутренней и внешней среде факторов, негативно влияющих на формирование конечного массива данных. Эти факторы приводят к тому, что выходной информационный поток содержит искаженные и неполные данные, малопригодные для эффективной поддержки принятия решений в прикладных и научных областях.

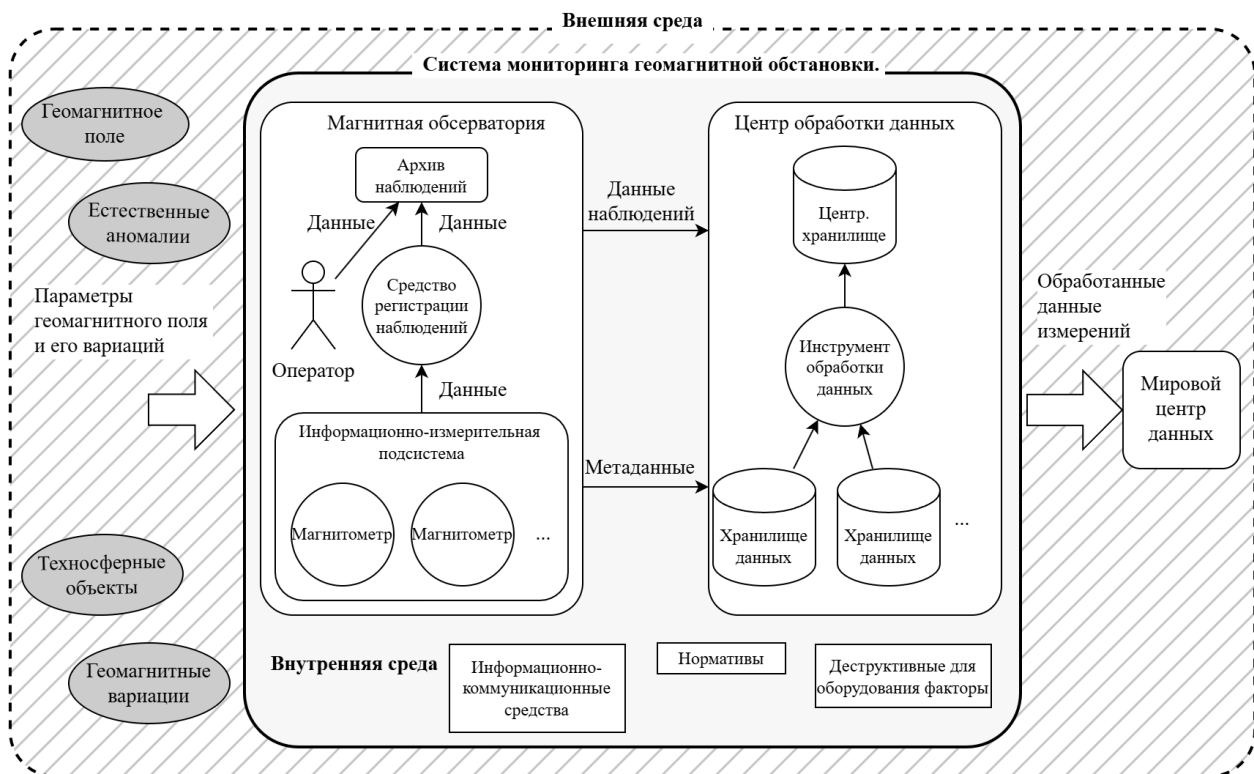


Рис. 1 Представление геомагнитного мониторинга с позиций системного анализа

Для строгого описания этой системы применяется теоретико-множественный аппарат. Система геомагнитного мониторинга S формально представляется как множество из N обсерваторий: $S = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}$. Система обеспечивает формирование данных D в соответствии с целевой функцией f , задающей правила отображения: $f: S \rightarrow D: D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ представляет собой наборы данных, полученные на каждой i -й магнитной обсерватории [Орл25].

Важным аспектом является то, что результат отображения подвержен влиянию внешних и внутренних факторов, формализуемых как множества F_{in} и F_{out} соответственно. Для i -й пространственной точки p_i с координатами (lat_i, lng_i) существует функция g_i , определяющая комплексное воздействие на результат элементов множеств внутренних и внешних факторов, временного параметра (t_i) и пространственного расположения (p_i) :

$$f: S \rightarrow D: f_i: m_i \rightarrow d_i; f_i = g_i(p_i, t_i, F_{in}, F_{out}); p_i \supset (lat_i, lng_i), i = 1, \dots, N.$$

Ситуация, при которой в некоторой произвольной точке p_k данные недоступны по тем или иным причинам, может быть описана следующим соотношением [Орл25]:

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

Для углубленного анализа элементов системы мониторинга применяется аппарат вепольного анализа, обеспечивающий графическое представление взаимодействий внутри системы. Вепольный анализ позволяет выявить слабые места системы и разработать механизмы нивелирования их негативного воздействия.

Вепольный анализ оперирует двумя основными понятиями – вещества и поля. Веществами обозначаются взаимодействующие объекты системы, а полями – энергия их взаимодействия. Веполем называется минимальная функциональная модель системы, состоящая из двух веществ и поля.

В контексте геомагнитного мониторинга рассматривается пара веществ V_1 и V_2 , представляющих соответственно систему регистрации данных и сами геомагнитные данные [Гар08]. Преобразование вещества V_1 в вещество V_2 осуществляется под воздействием нескольких полей: геомагнитного поля (P_1), техногенного ($P_{тф}$) и человеческого ($P_{чф}$) факторов, геомагнитных вариаций и аномалий, экстремальных проявлений космической погоды ($P_{кп}$) и других воздействующих факторов. Все поля, за исключением геомагнитного, обладают вредными связями (обозначаемыми «'»), искажающими результат преобразования:

$$V_2 \Rightarrow (P_1 + P_{\text{внеш}}' + P_{\text{внутр}}') \rightarrow V_1 \rightarrow V_2, \\ V_2 \Rightarrow ((P_1 + P_{тф}' + P_{кп}') + (P_{чф}' + P_{кп}' + P_{тф}') + P_{\text{внутр}}') \rightarrow V_1 \rightarrow V_2.$$

Полученная комплексная система, построенная как совокупность простых веполей, адекватно отражает особенности пространственно-временной динамики параметров геомагнитного поля, обусловленные комплексным воздействием группы внешних и внутренних факторов.

Для повышения эффективности системы поддержки принятия решений разработана расширенная вепольная схема, представленная на рис. 2. В предлагаемую структуру внедрена ЭлДЗ-система, где геомагнитные данные выступают как знание (З), на основании которого вырабатывается управляющее воздействие (Д), направленное на минимизацию негативного влияния вариаций на техносферные объекты (Э). Ключевым элементом усовершенствованной системы является компьютерная модель, которая совместно с информационно-измерительной системой участвует в формировании результирующих данных через подсистемы интерполяции, визуализации и оптимизации обработки пространственных данных.

Представленный системный анализ и формальное описание создают основу для разработки эффективных методов и алгоритмов обработки геомагнитных данных в условиях их дефицита, обеспечивая повышение достоверности и полноты информации для поддержки принятия решений в области управления критически важной инфраструктурой.

ПОДХОД К ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ГЕОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА

На основе результатов системного анализа, выявившего ключевые источники неопределенности в данных мониторинга, разработана комплексная стратегия пространственной интерполяции. Её принципиальным отличием является ситуационно-адаптивный подход, учитывающий пространственно-временной контекст и физическую природу геофизических процессов. В отличие от традиционных методов, применяющих единый алгоритм ко всему массиву данных, предлагаемое решение реализует динамический выбор оптимального метода интерполяции на основе анализа локальных условий.

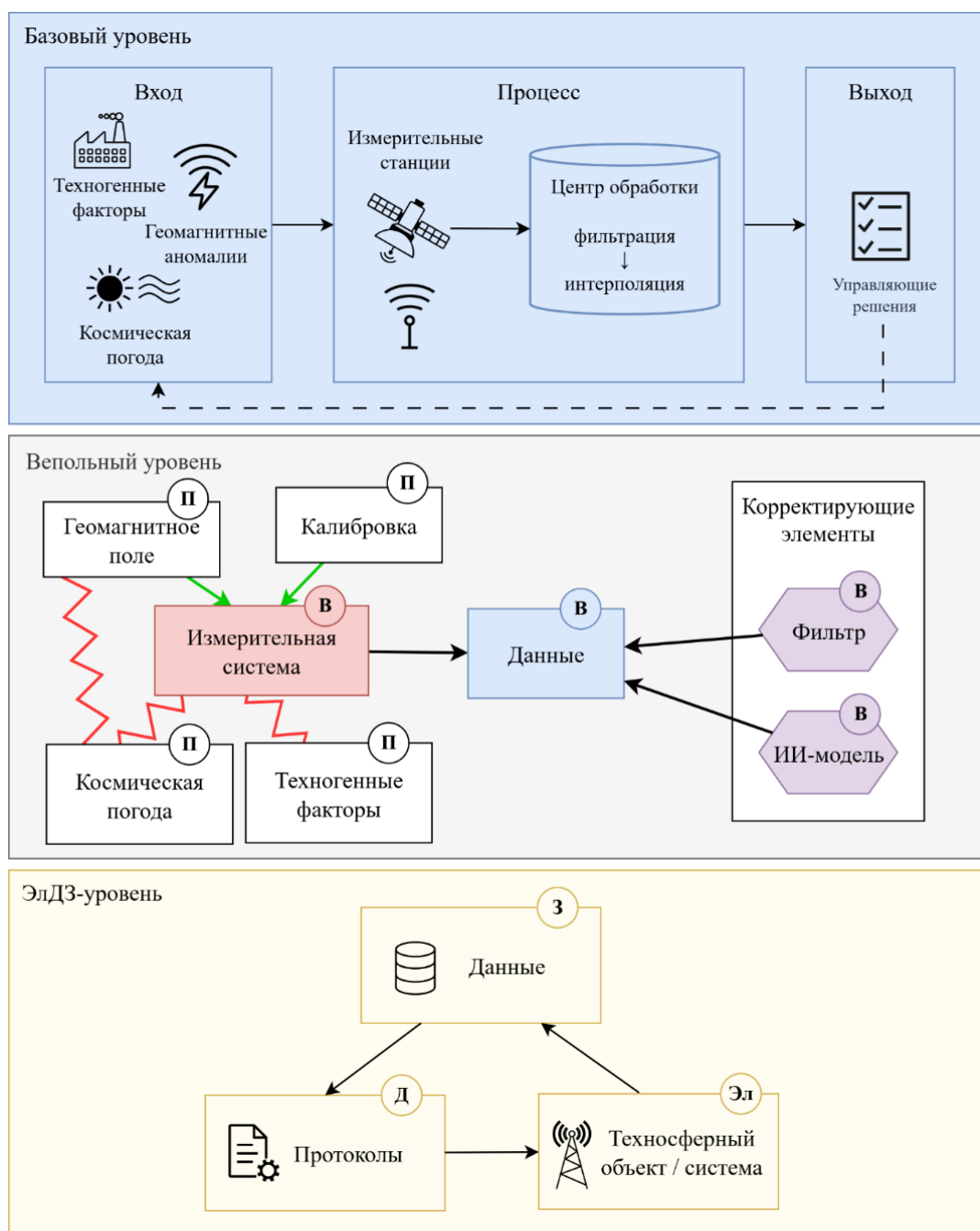


Рис. 2 Схема с форсированным веполем для системы геомагнитного мониторинга

Формально задача пространственной интерполяции определяется следующим образом: для n опорных точек $p_1, \dots, p_n$ с известными координатами (x_i, y_i) и значениями параметра Z требуется построить интерполяционную функцию $Z^*(p_0)$, позволяющую оценить значение параметра в произвольной точке p_0 . Ключевое наблюдение проведенного исследования заключается в том, что эффективность различных методов интерполяции существенно зависит от географического положения региона и текущей геофизической обстановки.

В работе предлагается подход к совершенствованию пространственной интерполяции, основанный на интеграции наиболее результативных существующих методов. Данная методика предполагает комбинирование проверенных алгоритмов интерполяции, демонстрирующих высокую эффективность в конкретных локальных зонах, что позволит значительно улучшить качество восстановления геопространственных данных.

Процесс реализации предложенного подхода начинается с подготовки исходных данных. На первом этапе проводится комплексный анализ информации, включающий нормализацию и приведение всех параметров к единому формату представления. Особое внимание уделяется унификации векторных примитивов при работе с картографическими данными, а также согласованию единиц измерения показателей. Важным аспектом подготовительной работы является стандартизация шага дискретизации временных рядов пространственных данных. При этом значительная часть операций целесообразно автоматизировать, хотя специфика геопространственной информации может создавать определённые сложности в реализации унифицированных программных решений.

Особую сложность представляет работа с многомерными данными, включая различные типы полей и тензоров, например, при анализе геомагнитного поля и его вариаций. Эти особенности необходимо учитывать при разработке соответствующего программного обеспечения.

Результатом всех подготовительных процедур становится формирование согласованного набора пространственных данных, готового к применению выбранных методов интерполяции для решения поставленных задач исследования.

Дальнейший этап реализации подхода направлен на выявление ключевых факторов, влияющих на исследуемые процессы в окружающей среде. При работе с геомагнитными данными особое внимание уделяется анализу пространственно-временных изменений параметров геомагнитного поля и его колебаний, которые формируют общую геомагнитную картину [Вор23с]. Для корректной оценки значимости различных факторов привлекаются квалифицированные специалисты в соответствующей области, имеющие практический опыт изучения подобных природных явлений.

Последующий этап работы посвящен детальному исследованию результативности различных методов пространственной интерполяции в зависимости от комбинации внутренних и внешних факторов. В рамках этого этапа формируется каталог методов интерполяции, которые будут применяться к исходным геопространственным данным.

Проводится систематизация всех возможных комбинаций значений внутренних и внешних факторов. Для каждой такой группы осуществляется серия вычислительных экспериментов, направленных на оценку эффективности каждого метода из предварительно составленного перечня. Это позволяет определить наиболее подходящие алгоритмы интерполяции для конкретных условий и параметров исследуемых данных.

Предложенная методика анализа результативности методов пространственной интерполяции базируется на следующем алгоритме. В рамках каждой группы геопространственных данных, объединенных определенными комбинациями значимых внутренних и внешних факторов, случайным образом выбирается одна точка. Значение её атрибутивного параметра условно принимается за неизвестное и подлежит восстановлению с помощью выбранного метода интерполяции, в то время как остальные точки используются как опорные.

После этого проводится серия вычислительных экспериментов, в ходе которых определяется атрибутивное значение в выбранной точке. Затем происходит сравнение полученного интерполированного значения с исходным параметром для вычисления среднеквадратической ошибки восстановления. Данная процедура последовательно повторяется для всех остальных точек в группе. Такой подход позволяет получить оценку точности работы метода интерполяции на различных наборах геопространственных данных с учетом влияния значимых факторов окружающей среды.

Результаты проведенной работы показали следующее. Для высокоширотных регионов в условиях спокойной магнитосферы оптимальные результаты демонстрирует метод простого кригинга с постоянным средним значением [Zha23]:

$$Z^*(x_0, y_0) = m + \sum \lambda_i [Z(x_i, y_i) - m].$$

В периоды магнитных бурь предпочтительнее использование универсального кригинга, моделирующего тренд данных как линейную комбинацию базисных функций [Leb19]:

$$Z^*(x_0, y_0) = \sum f_k(x_i, y_i) \beta_k + R(x_0, y_0).$$

Для низкоширотных и экваториальных регионов наиболее эффективной оказывается триангуляция Делоне, обеспечивающая оптимальное разбиение пространства на непересекающиеся треугольники. Особое внимание уделено автоматическому определению границ пространственных областей и учету факторов внешней среды, в частности значений Kp -индекса, характеризующих уровень геомагнитной активности [Bop17].

Представляется целесообразным отметить возникающую при обработке данных мониторинга проблему визуализации интерполированных данных. В работе рассматривается такой инструмент визуализации, основанный на векторных моделях, как пространственные изолинии. Под пространственной изолинией понимается изображение на картографической подложке в виде линии, в каждой точке которой соответствующий атрибутивный параметр сохраняет значение [Dja22, Ююк19].

Рассмотрим произвольную пространственную изолинию P , которая состоит из M точек в пространстве. Каждая точка характеризуется парой пространственных координат (x_i, y_i) . При этом все точки данной полилинии обладают одинаковым атрибутивным значением, которое определяется функцией $f(x_i, y_i)$ и остается постоянным для каждой точки этой линии:

$$P = \{ \{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\}, \dots, \{x_M, y_M\} \}, f(x_i, y_i) = \text{const для } \forall i = 1, \dots, M.$$

В случае с нерегулярной мониторинговой сетью наблюдается неравномерное распределение точек на пространственной изолинии. Это означает, что расстояние d между соседними точками изолинии варьируется и не является постоянным [Bop23]. Так, к примеру, рассмотрим произвольные точки A, B, C, D , неравномерно размещенные на пространственной полилинии P :

$$d(A, B) \neq d(C, D); A = (x_i, y_i); B = (x_j, y_j); C = (x_k, y_k); D = (x_l, y_l);$$

$$\text{для } \forall i, j, k, l = 1, \dots, M, A \neq B \neq C \neq D.$$

Необходимо интерполировать пространственную полилинию P таким образом, чтобы при введении новых пространственных точек с вычисленными парами географических координат расстояние между всеми точками результирующей полилинии не менялось (для любых A, B, C, D : $d(A, B) = d(C, D)$).

Для построения пространственных изолиний, обеспечивающих адекватное отображение результатов на сферической поверхности, предложена модификация метода Клафа–Точера [Gro22]. Метод основан на триангуляции данных с последующим определением для каждого треугольника кубического полинома:

$$F(x, y) = \sum c_{ij} x^i y^j.$$

Триангуляция Клафа–Точера представляет собой локальный метод интерполяции, обладающий важным преимуществом — высокой скоростью обработки значительных массивов пространственных данных. Благодаря своей локальной природе, алгоритм обеспечивает быструю обработку информации без существенного снижения производительности.

Особенность метода заключается в формировании гладкой интерполяционной поверхности, которая эффективно отражает локальные закономерности в исследуемых данных [Bop23].

Формирование новых точек достигается пространственной интерполяцией, которая применима только в пределах некоторой выпуклой оболочки. В контексте географических координат выпуклая оболочка задана в пределах прямоугольника со сторонами, образованными линиями 90° южной и северной широты, 0° и 360° восточной долготы. При трехмерной визуализации возникает специфическая проблема: на линиях долготы 0° и 360° появляются разрывы изолиний.

Для устранения артефактов визуализации, связанных с разрывами изолиний на границах картографических проекций, разработан метод дублирования опорных точек в области нулевого меридиана. Этот подход позволяет обеспечить целостность изолиний при переходе через линию смены дат, сохраняя топологическую корректность визуального представления данных.

Предложенный комплекс методов обеспечивает значительное улучшение качества как собственно интерполяции, так и визуализации результатов, что подтверждается экспериментальными данными, представленными в следующих разделах работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки работоспособности и оценки эффективности предложенных решений был создан исследовательский прототип веб-приложения для обработки, анализа и визуализации геомагнитных данных.

Исходными данными для экспериментов выступили замеры параметров геомагнитного поля и его вариаций, собранные наземными магнитными обсерваториями и вариационными станциями. Эти материалы доступны через проект SuperMAG [Gje12]. В состав датасета входят временные ряды с измерениями параметров геомагнитного поля, зафиксированными с минутной периодичностью, дополненные географическими координатами станции/обсерватории. Набор данных охватывает наблюдения 2023 года, когда были зафиксированы интенсивные солнечные вспышки и экстремальные показатели космической погоды. Исследования проводились на основе информации от 297 магнитных обсерваторий и вариационных станций.

Перед началом основной работы был отобран набор наиболее эффективных методов пространственной интерполяции для различных комбинаций внешних и внутренних факторов. Для каждого метода был разработан отдельный серверный модуль, вычисляющий значения поля в заданных геопространственных точках на основе имеющихся геомагнитных данных. Дополнительно был создан программный механизм для автоматического выбора оптимального метода интерполяции с учётом текущих условий — как внешних (геомагнитная активность, K_p -индекс), так и внутренних (расположение в пространстве).

Тестирование проводилось с использованием компьютера с процессором Intel Core i5 10300H (2,5 ГГц) и 4 ГБ оперативной памяти.

В ходе серии вычислительных экспериментов была проведена детальная оценка эффективности предложенного адаптивного алгоритма пространственной интерполяции. Основным критерием оценки выступал корень из среднеквадратической ошибки (RMSE) [Hod22] при сравнении с традиционными методами интерполяции.

Исследования выполнялись на различных наборах геомагнитных данных, собранных в периоды разной геомагнитной активности для трёх пространственных зон:

- среднеширотной;
- высокоширотной;
- низкоширотной.

Геомагнитная активность классифицировалась по планетарному индексу на три категории:

- спокойная магнитосфера;
- слабая магнитная буря;
- сильная магнитная буря.

Методика экспериментов предусматривала случайный выбор одной пространственной точки из исходного набора данных на каждом этапе. Значение параметра геомагнитного поля в этой точке определялось методом интерполяции, после чего сравнивалось с фактическим значением. Общее количество экспериментов для каждой комбинации факторов составило 1800.

Для сравнения эффективности был выбран ряд классических методов интерполяции:

- линейная интерполяция;
- метод обратно взвешенных расстояний;
- полиномиальная регрессия;
- триангуляция Делоне;
- кригинг;
- метод Шепарда;
- радиальная интерполяция;
- метод градиентных плоскостей;
- метод сплайнов;
- метод трендов.

Результаты экспериментов продемонстрировали значительное преимущество предложенного адаптивного алгоритма. Снижение ошибки восстановления геомагнитных данных (RMSE) в среднем составило:

- в среднеширотных областях 4,71 нТл;
- в высокоширотных областях 4,95 нТл;
- в низкоширотных областях 16,7 нТл.

Полученные данные свидетельствуют о существенном превосходстве адаптивного алгоритма над традиционными методами интерполяции в различных условиях.

Важным аспектом исследования стало решение проблемы артефактов, которые появляются при создании пространственных изолиний на нерегулярной сетке мониторинга. Особенно часто такие дефекты возникают при пространственной интерполяции на границах географических долгот, преимущественно в точках с долготой 0° и 360° . Эти артефакты проявляются как разрывы в пространственных полилиниях, что существенно снижает качество визуализации данных.

Для тестирования разработанного решения использовался набор данных, содержащий 11 атрибутивных параметров, отражающих пространственно-временную анизотропию геомагнитных показателей. Среди них — компоненты вектора геомагнитного поля, магнитное склонение, магнитное наклонение и другие характеристики.

В целях наглядности и информативности экспериментов был выбран один из параметров — солнечное зенитное расстояние (в датасете обозначен «sza»). Этот показатель использовался для построения пространственных изолиний и демонстрации результатов до и после применения предложенного подхода, что позволило провести анализ эффективности решения. Подобный анализ может быть проведён и для остальных параметров набора данных.

В ходе работы был создан специальный программный интерфейс (API), доступный по URL-адресу. Результатом работы этого интерфейса является набор изолиний в формате GeoJSON.

С помощью разработанного прототипа были получены различные варианты пространственных изолиний, отражающих геомагнитные данные проекта SuperMAG. Визуальный анализ показал, что исходная визуализация содержала артефакты в виде разрывов полилиний (рис. 3, а, в). После внедрения предложенного алгоритма устранения разрывов на уровне серверного сценария все выявленные дефекты были полностью устранены (рис. 3, б, г).

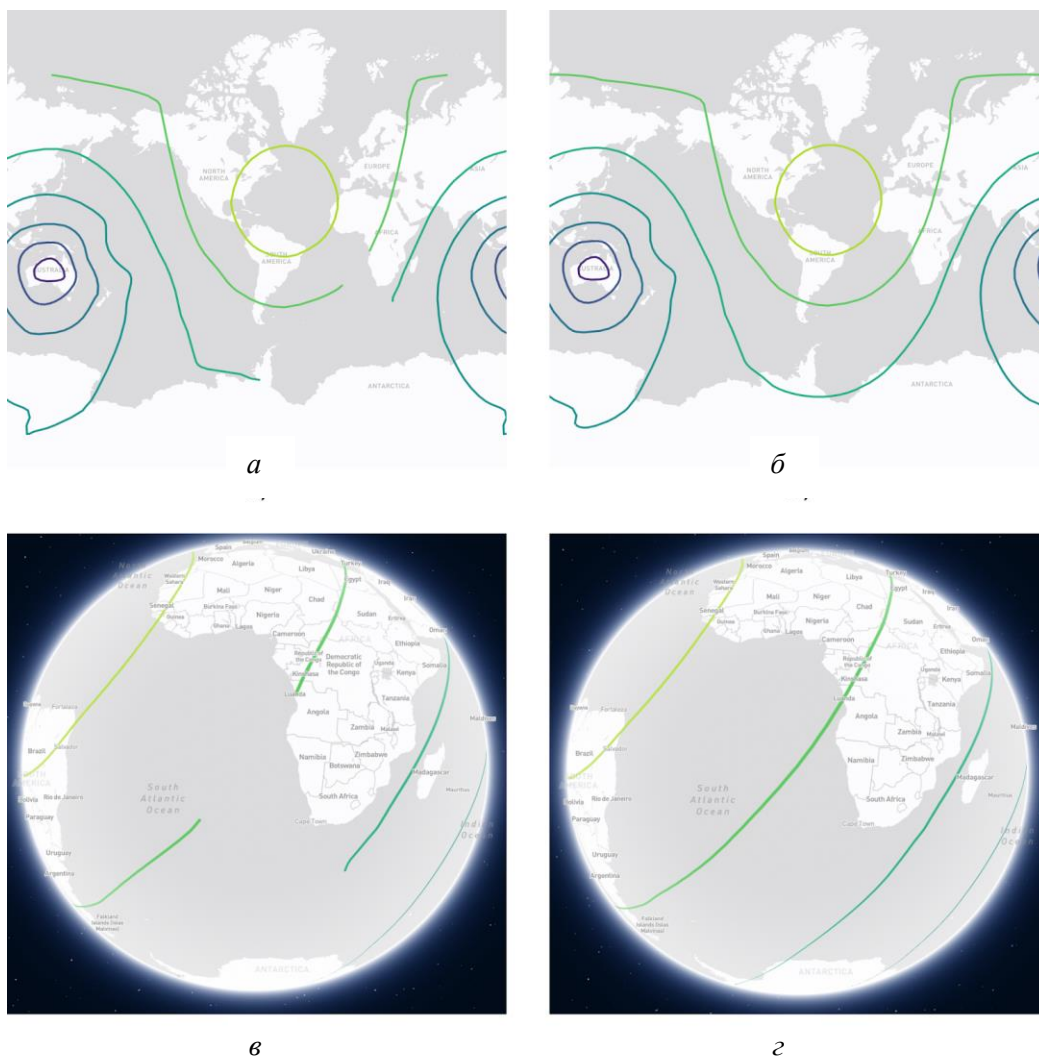


Рис. 3 Экранные формы сравнительных экспериментов по визуализации пространственных изолиний: а, б – плоская картографическая проекция для изолиний, сформированных без корректировки и с корректировкой соответственно; в, г – сферическая картографическая проекция для изолиний, сформированных без корректировки и с корректировкой соответственно

Для оценки эффективности устранения дефектов в геопространственной визуализации были определены ключевые метрики качества:

- абсолютное количество пространственных линий уровня, содержащих видимые при рендеринге и идентифицируемые при программной обработке артефакты пространственных изолиний;
- удельный вес пространственных линий уровня, содержащих видимые при рендеринге и идентифицируемых при программной обработке артефакты пространственных изолиний;
- максимальное расстояние между начальной и конечной пространственными точками представленных в анализируемом варианте пространственных линий уровня [Бур23].

С помощью созданного веб-приложения была реализована генерация и визуализация системы пространственных изолиний для магнитных обсерваторий и вариационных станций проекта SuperMAG за 2023 год. Автоматизированные эксперименты проводились с использованием клиентских и серверных сценариев, всего было выполнено около 500 вычислительных испытаний. В каждом эксперименте осуществлялась генерация и последующая визуализация пространственных изолиний с интерполяцией геомагнитных данных на трёхмерном виртуальном глобусе.

На каждом этапе эксперимента специальный серверный сценарий, интегрированный в исследовательский прототип, формировал подробный отчёт с анализом исходных и обработанных пространственных изолиний.

Все результаты, включающие усредненные значения метрик качества метода устранения разрывов в пространственных изолиниях, были систематизированы и представлены в обобщенном отчете (таблица).

Таблица

Результаты анализа эффективности метода устранения артефактов

Метрика Данные	Абсолютное количество пространственных линий уровня с артефактами, шт	Удельный вес пространственных линий уровня с артефактами, шт	Максимальное расстояние между начальной и конечной точками, км
Оригинальные пространственные изолинии	32	0,24	230
Пространственные изолинии после обработки предложенным методом	0	0	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный адаптивный алгоритм обработки геомагнитных данных имеет уникальную особенность: он разделяет весь массив информации на отдельные логические группы. Для каждой такой группы выбирается свой оптимальный метод интерполяции, который работает независимо от других. Такой подход позволяет максимально снизить погрешность при учёте как пространственного расположения данных, так и внешних факторов, влияющих на описываемые процессы.

Второй разработанный метод направлен на устранение визуальных дефектов при отображении геомагнитных параметров. Его суть заключается в применении усовершенствованной техники сферической триангуляции. В основе метода лежит алгоритм Клафа–Точера, адаптированный для работы со сферическими поверхностями. Особенностью метода является процедура дублирования точек вдоль основного меридиана, что позволяет не только ликвидировать разрывы в изолиниях, но и сохранять важные топологические характеристики данных, существенно повышая точность их визуального представления.

Оба подхода демонстрируют эффективность в решении своих задач и могут быть успешно применены при обработке геомагнитных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- | | |
|---|---|
| <p>[Dja22] Papadakis G, Mandilaras G, Mamoulis N, Koubarakis M. Static and dynamic progressive geospatial interlinking // ACM Trans Spat Algorithms Syst. 2022; Vol. 8. N. 2. P. 1-41. DOI: 10.1145/3510025.</p> <p>[Gje12] Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique // J. Geophys. Res. 2012. No. 117. P. A09213. DOI: 10.1029/2012JA017683. EDN: FNUNYD.</p> <p>[Gro22] Grošelj J., Knez M. Generalized C1 Clough–Tocher splines for CAGD and FEM // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2022. Vol. 395. DOI: 10.1016/j.cma.2022.114983.</p> <p>[Hod22] Hodson, T. O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not // Geoscientific Model Development, 2022, vol. 15, n. 14, p. 5481-5487. DOI: 10.5194/gmd-15-5481-2022. EDN: BMVVIF.</p> | <p>Papadakis G, Mandilaras G, Mamoulis N, Koubarakis M. Static and dynamic progressive geospatial interlinking // ACM Trans Spat Algorithms Syst. 2022; Vol. 8. N. 2. P. 1-41. DOI: 10.1145/3510025.</p> <p>Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique. J. Geophys. Res. 2012. No. 117. P. A09213. DOI: 10.1029/2012JA017683. EDN: FNUNYD.</p> <p>Grošelj J., Knez M. Generalized C1 Clough–Tocher splines for CAGD and FEM // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2022. Vol. 395. DOI: 10.1016/j.cma.2022.114983.</p> <p>Hodson, T. O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. Geoscientific Model Development, 2022, vol. 15, n. 14, p. 5481-5487. DOI: 10.5194/gmd-15-5481-2022. EDN: BMVVIF.</p> |
|---|---|

- [Leb19] Lebrezn H., Bardossy A. Geostatistical interpolation by quantile kriging // *Hydrology and Earth System Sciences* 2019; 23; 1633-1648. DOI: [10.5194/hess-23-1633-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-1633-2019).
- [Zha23] Zhang H., Tian Y., Zhao P. Dispersion Curve Interpolation Based on Kriging Method // *Applied Sciences* 2023; 13; 2557. DOI: [10.3390/app13042557](https://doi.org/10.3390/app13042557). EDN: EFYKTR.
- [Бур23] Буряковский П. К. Подход к определению кратчайшего расстояния между объектами разнородной геопро- странственной геометрии // *СИИТ*. 2023. Т. 5, № 5(14). С. 88-94. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no5-p88](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no5-p88). EDN: ZWGBWG.
- [Вор13] Воробьев А. В., Шакирова Г. Р. Автоматизированный анализ невозмущенного геомагнитного поля на основе технологии картографических веб-сервисов // *Вестник УГАТУ*. 2013. Т. 17, № 5(58). С. 177-187. EDN: RPWYQF.
- [Вор17] Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Оценка влияния геомаг- нитной активности на метрологические характеристики инклинометрических информационно-измерительных систем // *Измерительная техника*. 2017. № 6. С. 21-24. EDN: YZJOQV.
- [Вор18] Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Корреляционный анализ геомагнитных данных, синхронно регистрируемых маг- нитными обсерваториями INTERMAGNET // *Геомагне- тизм и аэронавигация*. 2018. Т. 58, № 2. С. 187-193. DOI: [10.7868/S0016794018020049](https://doi.org/10.7868/S0016794018020049). EDN: LBINSX.
- [Вор19] Воробьев А. В., Воробьева Г. Р., Юсупова Н. И. Концеп- ция единого пространства геомагнитных данных // *Труды СПИИРАН*. 2019. Т. 18, № 2. С. 390-415. DOI: [10.15622/sp.18.2.390-415](https://doi.org/10.15622/sp.18.2.390-415). EDN: ZDCFET.
- [Вор23] 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](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1127). EDN: VQXSWD.
- [Вор23b] Воробьев А. В. Методологические основы обработки пространственной информации для поддержки приня- тия решений на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнит- ных данных) // *СИИТ*. 2023. Т. 5, № 4(13). С. 3-27. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no4-p03](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no4-p03). EDN: LLACNX.
- [Вор23c] Воробьева Г. Р. Методологические основы обработки неоднородной пространственно-временной информа- ции в системах поддержки принятия решений на ос- нове технологий больших данных (на примере геомаг- нитных данных) // *СИИТ*. 2023. Т. 5, № 3(12). С. 3-26. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no3-p3](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no3-p3) EDN: BBUXQT.
- [Гар08] Гареев Р. Т. Эвристические приемы ТРИЗ. М.: МГИУ, 2008. 134с.
- [Орл25] Орлов Г. О., Фарваев Э. Ф. Модели и методы адаптив- ной интерполяции и глифовой визуализации геопро- странственных данных (на примере геомагнитной ин- формации) // *СИИТ*. 2025. Т. 7, № 1(20). С. 86-95. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no1-p86](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no1-p86). EDN: BQYKNR.
- [Пет18] Петров В. Структурный анализ систем. Вепольный ана- лиз. ТРИЗ. Екатеринбург: Издательские решения, 2018. 280 с.
- [Ююк19] Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изо- линий // *Вестник государственного университета мор- ского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2019. № 6(58). С. 1026-1036. DOI: [10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036](https://doi.org/10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036). EDN: PSJYOY.
- Lebrezn H., Bardossy A. Geostatistical interpolation by quantile kriging. *Hydrology and Earth System Sciences* 2019; 23; 1633-1648. DOI: [10.5194/hess-23-1633-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-1633-2019).
- Zhang H., Tian Y., Zhao P. Dispersion Curve Interpolation Based on Kriging Method. *Applied Sciences* 2023; 13; 2557. DOI: [10.3390/app13042557](https://doi.org/10.3390/app13042557). EDN: EFYKTR.
- Buryakovsky P. K. Approach to determining the shortest distance between objects of heterogeneous geospatial ge- ometry // *SIIT*. 2023. Vol. 5, No. 5(14). P. 88-94. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no5-p88](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no5-p88). EDN: ZWGBWG.
- Vorobev A. V., Shakirova G. R. Automated analysis of the unperturbed geomagnetic field based on mapping technol- ogy web services. *Vestnik UGATU*. 2013. Vol. 17. No. 5 (58), pp. 177-187. EDN: RPWYQF. (in Russian).
- Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Assessment of the influence of geomagnetic activity on the metrological characteristics of inclinometric information-measuring systems. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2017. (6). 21-24. EDN: YZJOQV. (in Russian).
- Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Correlation analysis of geo- magnetic data synchronously recorded by INTERMAGNET magnetic observatories. *Geomagnetism and aeronomy*. 2018. Vol. 58. No. 2. pp. 187-193. DOI: [10.7868/S0016794018020049](https://doi.org/10.7868/S0016794018020049). EDN: LBINSX. (in Russian).
- Vorobev A. V., Vorobeva G. R., Yusupova N. I. Conception of Geomagnetic Data Integrated Space. *SPIIRAS Proceed- ings*. 2019. Vol. 18. No. 2. pp. 390-415. DOI: [10.15622/sp.18.2.390-415](https://doi.org/10.15622/sp.18.2.390-415). EDN: ZDCFET. (in Russian).
- Vorobev A. V., Vorobeva G. R. An approach to detecting and eliminating spatial contour artifacts in Web GIS appli- cations. *Computer Optics*. 2023. Vol. 47. No. 1. pp. 126-136. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-1127](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1127). EDN: VQXSWD. (in Russian).
- 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) // *SIIT*. 2023. Vol. 5, No. 4(13). P. 3-27. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no4-p03](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no4-p03). EDN: LLACNX.
- Vorobyova G. R. Methodological foundations of processing heterogeneous spatial temporal information in decision support systems based on big data technologies (using geo- magnetic data as an example) // *SIIT*. 2023. Vol. 5, No. 3(12). P. 3-26. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no3-p3](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no3-p3) EDN: BBUXQT.
- Gareev R. T. Heuristic techniques of TRIZ. Moscow: MGIU. 2018. 134 p. (in Russian).
- Orlov G. O., Farvaev E. F. Models and methods of adaptive interpolation and glyph visualization of geospatial data (us- ing geomagnetic information as an example) // *SIIT*. 2025. Vol. 7, No. 1(20). P. 86-95. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no1-p86](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no1-p86). EDN: BQYKNR.
- Petrov V. (2018) *Strukturnyj analiz sistem. Vepol'nyj analiz. TRIZ* [Structural analysis of systems. Su-field analysis. TRIZ]. Ekaterinburg: Publishing solutions. 280 p. (in Russian).
- Yuyukin I. V. Spline-interpolation of navigation contours, *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rech- nogo Flota Imeni Admirala S. O. Makarova*, 2019, vol. 6, no. 58, pp. 1026-1036. DOI: [10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036](https://doi.org/10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036). EDN: PSJYOY. (in Russian).

ОБ АВТОРЕ | ABOUT THE AUTHOR

ФАРВАЕВ Эмиль Фанильевич

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

farvaev.emil@gmail.com ORCID: 0009-0001-4107-8950.

Аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики.

FARVAEV Emil Fanilevich

Ufa University of Science and Technology, Russia.

farvaev.emil@gmail.com ORCID: 0009-0001-4107-8950.

Postgraduate student, Dept of Computational Mathematics and Cybernetics.

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Применение вепольного анализа и геостатистики для мониторинга геомагнитного поля в условиях дефицита данных.**Автор:** Фарваев Э. Ф.

Аннотация: В статье рассматривается актуальная проблема обработки данных мониторинга геомагнитного поля в условиях их значительного дефицита, вызванного неравномерным распределением станций наблюдения, внешними возмущениями и артефактами измерений. Предлагается комплексный подход, интегрирующий методы вепольного анализа для идентификации источников неопределенности данных и адаптивные алгоритмы пространственной интерполяции на основе геостатистики. Новизна исследования заключается в разработке кластерно-адаптивного алгоритма, который динамически выбирает оптимальный метод интерполяции (кригинг, триангуляция Делоне) в зависимости от пространственно-временного контекста и геофизических условий. Для устранения артефактов визуализации на сферических поверхностях предложен метод модифицированной триангуляции Клафа–Точера с дублированием точек вдоль главного меридиана, обеспечивающий целостность изолиний. Эффективность подхода подтверждена экспериментально на данных проекта SuperMAG, показав снижение ошибки интерполяции в среднем на 13,3% и полное устранение артефактов визуализации. Разработанное алгоритмическое обеспечение реализовано в виде высокопроизводительного веб-приложения с микросервисной архитектурой, обеспечивающей оперативный доступ к обработанным данным для поддержки принятия решений.

Ключевые слова: Вепольный анализ; геостатистика; пространственная интерполяция; геомагнитное поле; дефицит данных.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Title: Application of su-field analysis and geostatistics for geomagnetic field monitoring in conditions of data deficit.**Author:** Farvaev E. F.

Abstract: The article considers the pressing issue of processing geophysical field monitoring data under conditions of their significant deficit caused by uneven distribution of observation stations, external disturbances and measurement artifacts. A comprehensive approach is proposed that integrates Su-field analysis methods for data uncertainty sources identification and adaptive algorithms of spatial interpolation based on geostatistics. The novelty of the study lies in the development of a cluster-adaptive algorithm that dynamically selects the optimal interpolation method (kriging, Delaunay triangulation) depending on the spatio-temporal context and geophysical conditions. To eliminate visualization artifacts on spherical surfaces, a modified Clough-Tocher triangulation method with point duplication along the main meridian is proposed, ensuring the continuity of isolines. The effectiveness of the approach is confirmed experimentally on the data of SuperMAG project, showing an average reduction in interpolation error by 13.3% and complete elimination of visualization artifacts. The developed algorithmic ware is implemented as a high-performance web application with micro-service architecture, providing operational access to processed data to support decision-making.

Key words: Su-field analysis; geostatistics; spatial interpolation; geomagnetic field; data deficit.

Language: Russian.

The article was received by the editors on 15 July 2025.