

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-151-159

УДК 004.9

Подход к решению проблемы дефицита геомагнитных данных в задачах поддержки принятия решений

Гульнара Равиловна Воробьева¹, Андрей Владимирович Воробьев²,
Эмиль Фанильевич Фарваев³✉

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

¹ gulnara.vorobeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7878-9724>

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

³ farvaev.emil@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0001-4107-8950>

Аннотация

Введение. Одной из главных проблем применения данных в задачах поддержки принятия решений является их дефицит в определенных пространственных точках/областях ввиду невозможности проведения соответствующих измерений. Примером этого являются данные о состоянии магнитного поля Земли (геомагнитные данные), на основании которых принимаются решения для сокращения негативного воздействия экстремальных геофизических событий на объекты и системы техносферы (линии электропередач, системы связи, автоматика железных дорог и пр.). Анализ существующей инфраструктуры сбора геомагнитных данных с позиций системного анализа позволил идентифицировать неполное покрытие сетью мониторинга, что негативно сказывается на принятии решений при обеспечении техносферной безопасности в пространственных областях. На примере геомагнитных данных выявлено, что известные методы интерполяции, не учитывающие особенности пространственно-временных характеристик описываемых данными процессов и их зависимость от внешних факторов, недостаточно эффективно справляются с поставленной задачей. **Метод.** Для решения обозначенной проблемы предложен подход к адаптивной пространственной интерполяции, основной идеей которого является динамический подбор методов интерполяции, наиболее эффективных при различных факторах. Для примера геомагнитных данных в качестве таких факторов выбраны принадлежность пространственной точки определенной широтной зоне и индекс геомагнитной активности в рассматриваемый период времени. **Основные результаты.** Для оценки предлагаемого решения разработан прототип веб-ориентированного приложения. Эксперимент проведен с использованием геомагнитной информации проекта SuperMAG. При сравнении среднеквадратической ошибки интерполяции применение предлагаемого подхода показало большую эффективность, чем применение какого-либо отдельного метода интерполяции. **Обсуждение.** Предложенная адаптивная интерполяция может быть использована в системах, реализующих интерполяцию геопро пространственных данных, как альтернатива стандартным методам интерполяции, с целью повышения точности восстановления данных. Сделан вывод, что при работе с геомагнитными данными могут быть использованы данные о широтной зоне и геомагнитной активности. Интерполяция данных иной природы может потребовать предварительного анализа для выявления значимых факторов.

Ключевые слова

геопро пространственные данные, геомагнитные данные, системный анализ, пространственная интерполяция, поддержка принятия решений, веб-приложения

Благодарности

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

Ссылка для цитирования: Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Фарваев Э.Ф. Подход к решению проблемы дефицита геомагнитных данных в задачах поддержки принятия решений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 151–159. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-151-159

An approach to solving the problem of geomagnetic data scarcity in decision-making support

Gulnara R. Vorobeva¹, Andrei V. Vorobev², Emil F. Farvaev³✉

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

¹ gulnara.vorobeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7878-9724>

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

³ farvaev.emil@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0001-4107-8950>

Abstract

One of the main problems of using data in decision-making support is their scarcity in certain spatial points/areas due to the inability to carry out appropriate measurements. An example is the Earth's magnetic field data (geomagnetic data) which is used to make decisions to reduce the extreme geophysical events negative impact on objects and systems of the technosphere (power lines, communication systems, railway automation, etc.). An analysis of the existing geomagnetic data collection infrastructure from the standpoint of system analysis made it possible to identify incomplete coverage of the monitoring network, which negatively affects decision-making to ensure technosphere security in the relevant spatial areas. Using the example of geomagnetic data, it was revealed that the known interpolation methods, which do not take into account the features of the spatiotemporal characteristics of the processes described by the data and their dependence on external factors, do not deal effectively with the task. To solve this problem, an approach to adaptive spatial interpolation is proposed the main idea of which is the dynamic selection of interpolation methods that are most effective for various factors. For an example of geomagnetic data two factors were chosen: the affiliation of a spatial point to a certain latitude zone and the index of geomagnetic activity in the time period under consideration. To evaluate the proposed solution, a prototype of a web-based application was developed. The experiment was conducted using geomagnetic information from the SuperMAG project. The proposed approach has proved to be more effective than using any separate interpolation method when comparing the root-mean-square errors. Adaptive interpolation proposed in this paper can be used in systems implementing interpolation of geospatial data, as an alternative to standard interpolation methods, in order to increase the accuracy of data recovery. When working with geomagnetic data, the factors considered in this work (latitudinal zones and geomagnetic activity) can be used, but interpolation of data of a different nature will require preliminary analysis to identify significant factors.

Keywords

geospatial data, geomagnetic data, system analysis, spatial interpolation, decision support, web applications

Acknowledgements

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

For citation: Vorobeva G.R., Vorobev A.V., Farvaev E.F. An approach to solving the problem of geomagnetic data scarcity in decision-making support. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 151–159 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-151-159

Введение

В настоящее время наблюдается активное развитие систем поддержки принятия решений, базирующихся на применении геопространственных данных различного прикладного назначения. Как правило, такие данные являются результатом наблюдений и/или регистрации параметров различных процессов и явлений с использованием, например, информационно-измерительных устройств, размещаемых в некоторых точках пространства (или пространственных областях), однозначно задаваемых координатами в соответствующей координатной (обычно геодезической) системе.

Типичным примером пространственных данных являются результаты наблюдения геомагнитного поля и его вариаций. В контексте поддержки принятия решений данные такого типа используются для повышения безопасности эксплуатации объектов и систем техносферы в условиях экстремальной геофизической обстановки (например, сильной магнитной бури) [1, 2]. Во избежание подобных ситуаций оператору подстанции необходимо снизить мощность источников, ориентируясь, в частности, на актуальную информацию о геомагнитной обстановке в соответствующем про-

странственном регионе. Если размещение магнитометрических измерительных устройств затруднено или невозможно (что часто бывает, например, в суровых условиях арктического региона Земли), то наблюдается дефицит данных, необходимых для принятия решения.

Для решения обозначенной проблемы необходим метод, обеспечивающий непрерывность сети мониторинга геомагнитных параметров на основе известных данных с учетом особенностей пространственно-временной анизотропии соответствующего процесса. Фактически предполагается, что данные по параметру геомагнитного поля должны быть получены в любой пространственной точке, независимо от наличия магнитометрической аппаратуры. Мультиаспектный анализ известных решений геомагнитного мониторинга также ставит своей целью выявление основных проблем и перспективных направлений его развития с повышением эффективности соответствующих источников геомагнитных данных для конечных потребителей.

Целью работы является сравнение и анализ существующих методов интерполяции на наборах геомагнитных данных и реализация алгоритма адаптивной интерполяции на основе полученных результатов.

Состояние вопроса

Проблема дефицита геомагнитных данных известна достаточно давно и активно изучается, в том числе с точки зрения системного анализа [3, 4] соответствующих сетей мониторинга. Геомагнитные данные интерполируются известными детерминированными и статистическими методами. В первом случае для получения искомым данным используются функции расстояния между опорными точками — учитывается взаимное расположение искомым и известных пространственных объектов. Во втором случае применяются функции статистического пространственного сходства, которые рассчитываются как глобальные характеристики множества объектов при восприятии свойств отдельных объектов. Кроме того, известны математические модели и методы, обеспечивающие расчет параметров невозмущенного магнитного поля. Примером является IGRF (International Geomagnetic Reference Field) — модель, разработанная Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики и обновляемая каждые пять лет на основании наблюдений параметров магнитного поля Земли и его вариаций [3, 4]. Модель IGRF используется для расчета параметров главного магнитного поля на основании значений пространственных координат и анализируемого временного параметра. Однако модели подобного рода неприменимы в условиях неспокойной магнитосферы, а также в определенных широтных областях, где вариабельность поля плохо поддается прогнозу. Их возможно использовать в качестве эталона, но на практике применение полученных значений для принятия решений в критических ситуациях может быть сопряжено с серьезными последствиями [5, 6].

Для количественной оценки эффективности известных методов интерполяции применительно к геомагнитным данным была проведена серия вычислительных экспериментов над годовыми результатами наблюдений параметров геомагнитного поля магнитными обсерваториями проекта SuperMAG¹. На примере детерминированных и статистических методов интерполяции была рассчитана среднеквадратическая ошибка, значение которой составило в среднем от 3,8 до 11,8 нТл (табл. 1), что существенно превышает допустимую геофизическими нормативами величину.

Отметим, что в случае кратковременного отсутствия геомагнитных данных в отдельных случаях возможно их восстановление известными методами интерполяции временных рядов. Однако при существенных пропусках или отсутствии измерительного оборудования в каждой точке поверхности Земли, рассмотренные методы теряют свою эффективность. Кроме того, методы наилучшим образом применимы к относительно регулярным сетям мониторинга с минимальной анизотропией атрибутивных значений. Например, для геомагнитных данных, для которых атрибутивные значения напрямую зависят от комплекса внутренних и внешних факторов, а также региона наблюдения, такие методы интерполяции применять неэффективно. При этом, как показали

Таблица 1. Сравнительная оценка методов интерполяции применительно к геомагнитным данным

Table 1. Comparative evaluation of interpolation methods applied to geomagnetic data

Методы интерполяции геомагнитных данных	Среднеквадратическая ошибка, нТл
Линейная интерполяция	11,8
Обратно взвешенных расстояний	10,9
Полиномиальная регрессия	8,6
Триангуляция Делоне	3,8
Кригинг	4,9
Метод Шепарда	10,9
Радиальная интерполяция	10,1
Метод градиентных плоскостей	10,6
Метод сплайнов	11,3
Метод трендов	10,9

исследования, рассмотренные методы можно считать эффективными локально: для небольшого набора точек; для относительно регулярной опорной сети точек; для данных, демонстрирующих сравнительно низкую анизотропию внутри некоторого пространственного региона.

В результате анализа методов можно сделать вывод, что необходимым подход, который позволит эффективно (с точки зрения минимизации ошибки) восстанавливать данные (в том числе геомагнитные) и будет учитывать специфику внешних факторов и особенности пространственного распределения параметров описываемого процесса/явления/события.

Подход к интерполяции геомагнитных данных

Пусть известны значения пространственно-зависимого компонента вектора геомагнитного поля $\mathbf{H}$ в опорных n пространственных точках, каждая из которых задана парой географических координат — широты и долготы вида (x_n, y_n) . Тогда в результате пространственной интерполяции необходимо определить значение вектора геомагнитного поля $\mathbf{H}$ в произвольной точке с координатами (x_0, y_0) в форме соответствующей оценки $\mathbf{H}^*$:

$$\exists \{\mathbf{H}(x_1, y_1), \dots, \mathbf{H}(x_n, y_n)\}; \mathbf{H}(x_0, y_0) \approx \mathbf{H}^*(x_0, y_0).$$

При этом известно, что все компоненты вектора геомагнитного поля связаны между собой соотношениями вида:

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{G^2 + Z^2}, \\ G = F \cos I, Z = F \sin I, X = G \cos D, Y = G \sin D, \quad (1)$$

где X, Y — величины северного и восточного компонентов (оси измерения указывают в направлениях географических севера и востока); Z — величина вертикального компонента (ось указывает вниз, к поверхности Земли); G — величина горизонтального компонента

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://supermag.jhuapl.edu/mag/> (дата обращения: 30.08.2024).

(ось указывает в направлении магнитного севера); F — величина полного вектора напряженности; D — склонение; I — наклонение.

Если отсутствует значение одного из компонент, но другие составляющие известны, то недостающие данные могут быть получены из соотношений (1). Задача интерполяции в этом случае не ставится, поскольку данные в искомой точке восстанавливаются по известным значениям в этой же пространственной точке в соответствии с известными математическими моделями поля. В этой связи здесь и далее представляется целесообразным рассматривать задачу, в которой для искомой произвольной пространственной точки отсутствуют какие-либо значения по геомагнитному полю и его вариациям.

Пространственная анизотропия геомагнитного поля является основанием для выделения пространственных регионов, в которых параметры магнитного поля Земли характеризуются относительной однородностью и демонстрируют схожую динамику изменений под воздействием одних и тех же внешних факторов. Оценка степени связности соответствующих пространственно-временных рядов была проведена посредством анализа энтропийных характеристик опорных источников геомагнитной информации. Вычислительный эксперимент был проведен на основании результатов наблюдений нескольких магнитных обсерваторий, расположенных в пределах одной долготы и распределенных по широте с шагом порядка $3^\circ 45'$. Расчет информационной энтропии Шеннона показал, что наименьшая неопределенность наблюдается в районе средних широт ($46^\circ 54' N$) и возрастает по направлению к высоким и низким широтам (рис. 1, а). Аналогичные исследования, приведенные для других значений широт, показали повторяемость полученных зависимостей и подтвердили результаты анализа (рис. 1, б).

Соответствующие вычислительные эксперименты были проведены для анализа долготной зависимости информационной энтропии геомагнитных данных. Была установлена сравнительная статичность информационной энтропии по мере изменения долготы при фиксированной географической широте. Важно отметить, что схожие результаты были получены при ана-

лизе дополнительных энтропийных характеристик — взаимной информации и условной энтропии.

В общем виде полученные результаты теоретико-информационного анализа пары источников геомагнитных данных X и Y в зависимости от географических широты Lat и долготы $Long$ могут иметь вид:

$$H(X) \rightarrow \min : Lat \in (44^\circ 33', 46^\circ 54'); Long \sim \text{const};$$

$$H(X) \rightarrow \max : Long \sim \text{const}, Lat \rightarrow -90^\circ;$$

$$H(X) \rightarrow \max : Lat \rightarrow 90^\circ;$$

$$H(X) \rightarrow \text{const} : \forall Long; Lat \sim \text{const};$$

$$H(Y|X) = \min : Y = X;$$

$$H(Y|X) \rightarrow \max : Long \sim \text{const}; (Lat_y - Lat_x) \rightarrow \max;$$

$$H(Y|X) \rightarrow \max : Lat \sim \text{const}; (Long_y - Long_x) \rightarrow \max;$$

$$I(Y|X) = \max : Y = X;$$

$$I(Y|X) \rightarrow \max : Long \sim \text{const}; (Lat_y - Lat_x) \rightarrow \max;$$

$$I(Y|X) \rightarrow \max : Lat \sim \text{const}; (Long_y - Long_x) \rightarrow \max,$$

где H — информационная энтропия Шеннона; $I(X, Y)$ — взаимная информация; $H(Y|X)$ — условная энтропия.

Физическое объяснение полученных результатов теоретико-информационного анализа заключается в том, что значения параметров геомагнитного поля на средних широтах зависят от наименьшего количества факторов. При приближении к полюсам растет вероятность «скачкообразного» их изменения, уровень неопределенности при пространственном прогнозировании значений увеличивается, растет и среднеквадратическая ошибка прогнозирования временного ряда геомагнитных данных [7, 8]. Кроме того, в периоды высокой геомагнитной активности геомагнитные вариации выражены сильнее, чем в магнитоспокойные периоды. Такое поведение параметров магнитного поля связано с увеличением влияния различных внешних факторов при приближении к экватору или полюсам (например, кольцевые токи на экваторе и суббури в полярных областях). При этом на значения параметров геомагнитного поля в пределах одного широтного диапазона оказывают влияние одни и те же внешние факторы (или их совокупность), что приводит к тому, что

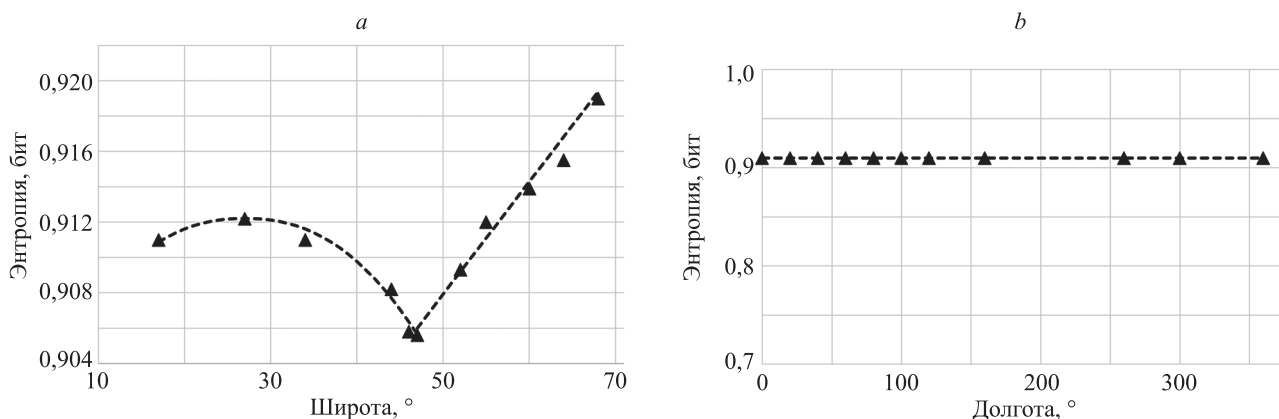


Рис. 1. Широтная (а) и долготная (б) зависимости информационной энтропии геомагнитных данных

Fig. 1. Latitude (a) and longitude (b) dependences of the information entropy of geomagnetic data

энтропия с изменением долготы остается относительно неизменной.

Для минимизации ошибки восстановления данных представляется целесообразным учитывать специфику пространственно-временного распределения параметров геомагнитного поля и его вариаций. В связи с тем, что эффективность различных методов варьируется в зависимости от внешних и внутренних условий, предлагается следующий алгоритм динамического подбора методов интерполяции.

- Проведение серии вычислительных экспериментов для определения эффективности известных методов интерполяции для различного сочетания внешних и внутренних факторов.
- Обучение отдельных моделей пространственной интерполяции на имеющихся наборах пространственных данных (опциональный этап).
- Подготовка пула методов для последующего применения для восстановления атрибутивных значений в произвольных пространственных точках.
- При поступлении запроса на интерполяцию значения в некоторой точке, оценить соответствующие внешние и внутренние факторы и в результате выбрать подходящий метод.

С учетом результатов проведенного теоретико-информационного анализа сеть мониторинга была декомпозирована для трех групп, разделенных по широте на высокоширотные, низкоширотные и приэкваториальные области. Для каждой из трех пространственных групп были проведены вычислительные эксперименты для выявления наиболее эффективных методов пространственной интерполяции для различных широт (данные проекта SuperMAG [9, 10]). В качестве дополнительных параметров использовались данные о значениях планетарного Kp -индекса, являющегося индикатором экстремального состояния космической погоды, обуславливающего сильные вариации геомагнитного поля (табл. 2). Стоит отметить, что подход можно расширить, добавив другие дополнительные

параметры или изменив декомпозицию пространственных областей.

Для всех проанализированных методов наблюдается повышение значения среднеквадратической ошибки по мере приближения к экстремальным широтам. При этом значительный вклад в результат обработки вносят внешние факторы, такие как уровень геомагнитной активности. Сравнительный анализ позволил ранжировать методы интерполяции по степени ошибки восстановления пространственных данных для разных регионов и определять оптимальные для каждой пространственной области и заданных внешних факторов, снижая общую ошибку интерполяции.

Для пространственной интерполяции магнитных данных в высоких широтах наилучшим методом оказался кригинг [11, 12]. Он основан на вариограмме, которая характеризует пространственную модель опорных (известных) точек. Весовой коэффициент каждой опорной точки зависит от ее территориального расположения относительно интерполируемой точки. Кригинг использует модель пространственной структуры, сформированную свойствами второго порядка — вариограммой или ковариацией по случайной функции [11].

В общем случае при кригинге каждой известной точке присваивается собственный весовой коэффициент. При этом, чем ближе пространственная точка к интерполируемой, тем больше значение соответствующего весового коэффициента [11]. Так, расчет интерполируемого значения $H^*(x_0, y_0)$ в произвольной точке (x_0, y_0) по опорным n значениям известных точек $Z(x_i, y_i)$ описывается регрессионным выражением вида [11]:

$$H^*(x_0, y_0) - m(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [H(x_i, y_i) - m(x_i, y_i)],$$

где $m(x_i, y_i)$ и $m(x_0, y_0)$ — математическое ожидание для $H(x_i, y_i)$ и $H(x_0, y_0)$; λ_i — весовой коэффициент i -ой точки.

Таблица 2. Сравнительная оценка методов интерполяции применительно к геомагнитным данным с учетом внешних и внутренних факторов. Среднеквадратическая ошибка, нТл

Table 2. Comparative evaluation of interpolation methods applied to geomagnetic data, taking into account external and internal factors. Standard error, nT

Методы интерполяции	Магнитная буря								
	Высокоширотные области			Низкоширотные области			Приэкваториальные области		
	сильная	слабая	нет	сильная	слабая	нет	сильная	слабая	нет
Линейная интерполяция	5,32	4,16	3,23	40,10	22,19	18,60	3,10	2,50	1,20
Обратно взвешенных расстояний	8,45	6,12	5,56	28,34	20,45	17,12	5,73	4,80	1,51
Полиномиальная регрессия	7,15	3,12	2,98	27,60	15,90	10,20	5,53	2,41	1,78
Триангуляция Делоне	3,45	2,19	1,82	3,50	2,12	0,22	1,31	0,65	0,17
Кригинг	2,51	1,89	1,6	12,70	10,12	7,36	1,35	0,97	0,54
Метод Шепарда	8,45	6,12	5,56	28,34	20,45	17,12	5,73	4,80	1,51
Радиальная интерполяция	6,97	4,78	3,18	28,70	15,80	10,60	12,10	4,86	3,21
Метод градиентных плоскостей	7,15	6,29	4,14	28,90	16,20	11,80	10,40	5,90	4,78
Метод сплайнов	9,12	7,15	5,12	27,60	16,98	12,10	11,50	5,95	5,97
Метод трендов	8,97	6,89	4,98	25,10	16,45	11,78	11,90	6,30	5,30

Отметим, что в разные периоды геомагнитной активности наибольшую эффективность в высокоширотных областях демонстрируют разные типы кригинга. В условиях спокойной магнитосферы наиболее эффективной является простая кригинг-интерполяция, а в условиях неспокойной магнитосферы — универсальная кригинг-интерполяция с трендом.

В случае простой кригинг-интерполяции предполагается, что среднее значение опорных пространственных точек постоянно и известно на всей области исследования ($m(z) = m = \text{const}$ для всех z). Простая кригинг-интерполяция удобна для локальной оценки, поскольку ее применение не требует, чтобы среднее было постоянным на всей оцениваемой области, а только в окрестности пространственной точки, для которой выполняется интерполяция [11, 12].

Оценка интерполируемого значения при универсальной кригинг-интерполяции с трендом выполняется посредством определения средневзвешенного значения соответствующих наблюдений. Формируемый при этом тренд определяется как линейная комбинация базисных функций $f_k(x_0, y_0)$ с коэффициентами β_k , которые неизвестны и постоянны внутри окрестности R оцениваемой точки (x_0, y_0) :

$$H^*(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) \beta_k + R(x_0, y_0).$$

В низких и средних широтах наилучшие результаты показала интерполяция на основе триангуляции Делоне [13, 14]. При этом формируется треугольник, составленный на основе известных точек P_1, P_2, P_3 (со значениями H_1, H_2, H_3 соответственно) и включающий интерполируемую точку. Уравнение плоскости для такого треугольника содержит коэффициенты a, b, c, d , определяемые следующим образом:

$$aX + bY + cZ + d = 0,$$

$$a = Y_1(H_2 - H_3) + Y_2(H_3 - H_1) + Y_3(H_1 - H_2),$$

$$b = H_1(X_2 - X_3) + H_2(X_3 - X_1) + H_3(X_1 - X_2),$$

$$c = X_1(Y_2 - Y_3) + X_2(Y_3 - Y_1) + X_3(Y_1 - Y_2),$$

$$d = X_1(Y_2H_3 - Y_3H_2) + X_2(Y_3H_1 - Y_1H_3) + \\ + X_3(Y_1H_2 - Y_2H_1),$$

где $X_1, Y_1, X_2, Y_2, X_3, Y_3$ — координаты точек P_1, P_2, P_3 ; H_1, H_2, H_3 — значения параметров магнитного поля в точках S_1, S_2, S_3 .

В общем виде модель пространственно-зависимой адаптивной интерполяции геомагнитных данных может быть описана следующей системой соотношений:

$$H^*(x_0, y_0) = \frac{-aX_0 - bY_0 - d}{c} : \text{Lat} \in (-90^\circ, 46^\circ 9'); \forall Kp;$$

$$H^*(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) \beta_k + R(x_0, y_0) : \text{Lat} \rightarrow 90^\circ; \\ Kp \in [5, 9];$$

$$H^*(x_0, y_0) - m(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [H(x_i, y_i) - m(x_i, y_i)] : \text{Lat} \rightarrow 90^\circ; \\ Kp \in [0, 4];$$

где Kp — индекс планетарной геомагнитной активности.

Оценка эффективности решения

Для оценки эффективности предложенного решения был реализован веб-ориентированный исследовательский прототип приложения, архитектура которого представлена на рис. 2. В его основе лежит архитектурный шаблон Model — View — Controller, который разделяет приложение на три компонента: модель, представление и контроллер [15, 16]. Модель отображает схему пространственных данных, их декомпозицию по пространственным признакам и параметрам внешних факторов, а также соответствующие методы интерполяции, полученные в результате анализа их эффективности. В частности, в модель входит объектно-ориентированное отображение этих данных при помощи Object-Relational Mapping (ORM) системы, взаимодействующей с реляционными базами данных [17]. Контроллер взаимодействует с данными и моделью, принимая запросы от клиента, обрабатывая их и формируя результаты. Взаимодействие с клиентом также происходит на уровне запросов. Компонент представления можно рассматривать как опциональный, так как решение представляет наибольший интерес и практическую пользу как удаленная функция для вычисления значения.

Функциональность приложения была реализована в двух формах. С одной стороны, представление обеспечивает передачу HTML-разметки элементов управления и мультимедиакомпонентов на клиентскую сторону для взаимодействия пользователя с результатом после его рендеринга в браузере (рис. 3). С другой стороны, предусмотрена возможность взаимодействия с серверной частью через RESTful API, чтобы стороннее приложение могло получить результат, отправляя запрос сервису [18–20].

Для каждого метода интерполяции был разработан свой серверный модуль, рассчитывающий значение поля в определенной точке на основе известных данных. Также создан серверный сценарий, выбирающий наиболее эффективный метод интерполяции в зависимости от внешних (геомагнитная обстановка, планетарный Kp -индекс) и внутренних (пространственное расположение) условий.

Эксперименты проводились на клиентской стороне с использованием компьютера с процессором Intel Core i5 10300N 2,5 ГГц, оперативной памятью размером 4 Гб и скоростью интернет-соединения 52,4 Мбит/с, а на серверной стороне — на базе веб-сервера с процессором 72 Intel® Xeon® Gold 6140 CPU @ 2,30 ГГц.

На первом этапе осуществлена оценка времени получения отклика от серверной стороны. Было обнаружено, что выполнение клиентского запроса с учетом информации о наиболее эффективном методе интерполяции занимает в среднем 12 с, что соответствует

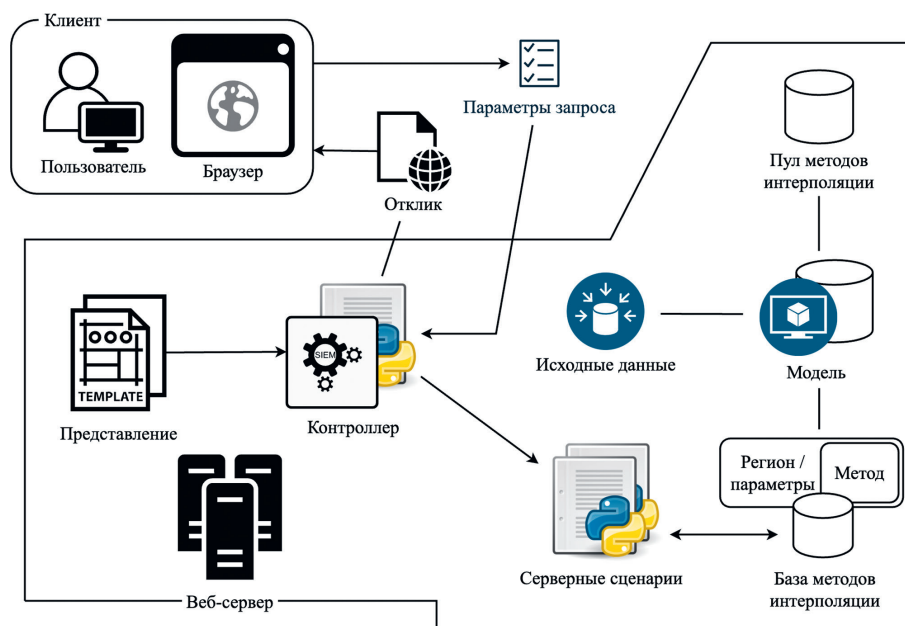


Рис. 2. Архитектура предлагаемого решения

Fig. 2. Proposed solution architecture

требованиям к высокопроизводительным веб-приложениям. На втором этапе оценивалась ошибка интерполяции при использовании предложенного адаптивного подхода в сравнении с существующими методами. Исследования проводились на геомагнитных данных в разные периоды геомагнитной активности и для раз-

ных пространственных областей: средне-, высоко- и низкоширотных.

Для проведения экспериментов из исходных данных на каждом этапе извлекалась одна пространственная точка, значение атрибута в которой требовалось вычислить методом интерполяции. Затем полученный ре-

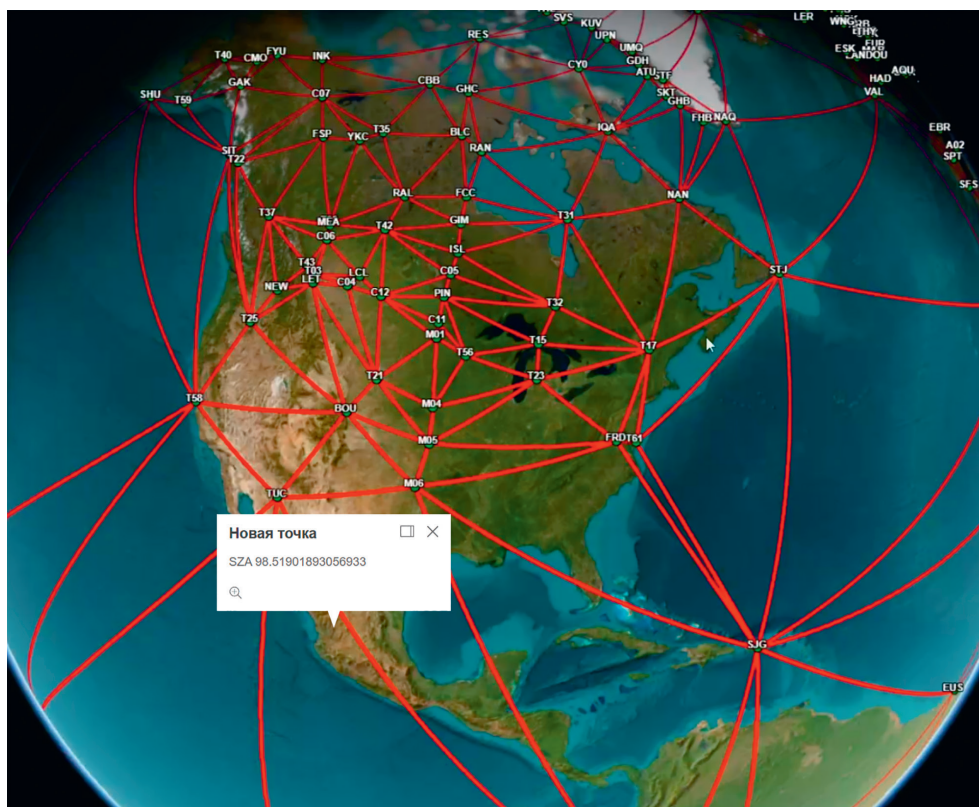


Рис. 3. Пример экранной формы исследовательского прототипа приложения

Fig. 3. An example of the screen form of the research prototype application

зультат сравнивался с исходным значением. Для каждой комбинации внешних и внутренних факторов было проведено около 50 вычислительных экспериментов, что позволило оценить качество предложенного метода пространственной интерполяции.

Анализ полученных результатов показал, что использование предложенного адаптивного подхода к интерполяции позволяет снизить среднеквадратическую ошибку восстановления пространственных данных по сравнению с существующими подходами следующим образом: в среднеширотных областях — на 4,71 нТл, в высокоширотных областях — на 4,95 нТл, в низкоширотных областях — на 16,7 нТл.

Заключение

Анализ системы геомагнитного мониторинга позволил выявить основные проблемы получения геомагнитных данных. В частности, была выявлена проблема отсутствия данных в произвольных точках земной поверхности по различным техническим и естественным причинам. Сформулирована концепция введения дополнительных компьютерных моделей в систему поддержки принятия решений на основе геомагнитной

информации таким образом, чтобы обеспечить получение данных о геомагнитной обстановке в тех точках, где отсутствуют средства измерения.

В работе предложен подход, основанный на комбинировании методов пространственной интерполяции, демонстрирующих наилучшие результаты восстановления данных при различных сочетаниях внешних и внутренних условий. На подготовительном этапе необходимо оценить значение ошибки интерполяции, которую обеспечивают различные методы восстановления для разных пространственных областей и значений внешних факторов. Далее при интерполяции определяется принадлежность восстанавливаемого значения пространственной области, оцениваются значения внешних факторов и определяется наиболее эффективный метод. По результатам выполняется восстановление значения выбранным методом.

На примере геомагнитной информации показана результативность предложенного решения. Для выделенных пространственных областей и различного уровня геомагнитной активности показано ранжирование методов интерполяции по их эффективности в контексте минимизации ошибки восстановления данных.

Литература

1. Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Sakharov Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. N 3. P. 1522. <https://doi.org/10.3390/app12031522>
2. Vorobev A.V., Vorobeva G.R. Approach to assessment of the relative informational efficiency of intermagnet magnetic observatories // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. V. 58. N 5. P. 625–628. <https://doi.org/10.1134/S0016793218050158>
3. Fournier A., Aubert J., Lesur V., Thebault E. Physics-based secular variation candidate models for the IGRF // *Earth, Planets and Space*. 2021. V. 3. P. 190. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01507-z>
4. Imboden D., Pfenninger S. *Introduction to Systems Analysis Mathematically Modeling Natural Systems*. Springer, 2013. 252 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30639-6>
5. Brown W., Beggan C., Cox G., Macmillan S. The BGS candidate models for IGRF-13 with a retrospective analysis of IGRF-12 secular variation forecasts // *Earth, Planets and Space*. 2021. V. 73. P. 42. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01301-3>
6. Petrov V., Bondar T. IZMIRAN candidate field model for IGRF-13 // *Earth, Planets and Space*. 2021. V. 73. P. 46. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01312-0>
7. Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis // *Solar-Terrestrial Physics*. 2022. V. 8. N 2. P. 84–90. <https://doi.org/10.12737/stp-82202213>
8. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeva G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. V. 20. P. ES6001. <https://doi.org/10.2205/2020ES000721>
9. Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2012. V. 117. N A9. P. A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
10. Waters C.L., Gjerloev J.W., Dupont M., Barnes R.J. Global maps of ground magnetometer data // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. N 11. P. 9651–9660. <https://doi.org/10.1002/2015JA021596>
11. Zhang H., Tian Y., Zhao P. Dispersion curve interpolation based on kriging method // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. N 4. P. 2557. <https://doi.org/10.3390/app13042557>

References

1. Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Sakharov Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 1522. <https://doi.org/10.3390/app12031522>
2. Vorobev A.V., Vorobeva G.R. Approach to assessment of the relative informational efficiency of intermagnet magnetic observatories. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 625–628. <https://doi.org/10.1134/S0016793218050158>
3. Fournier A., Aubert J., Lesur V., Thebault E. Physics-based secular variation candidate models for the IGRF. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73, pp. 190. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01507-z>
4. Imboden D., Pfenninger S. *Introduction to Systems Analysis Mathematically Modeling Natural Systems*. Springer, 2013, 252 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30639-6>
5. Brown W., Beggan C., Cox G., Macmillan S. The BGS candidate models for IGRF-13 with a retrospective analysis of IGRF-12 secular variation forecasts. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73, pp. 42. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01301-3>
6. Petrov V., Bondar T. IZMIRAN candidate field model for IGRF-13. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73, pp. 46. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01312-0>
7. 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, no. 2, pp. 84–90. <https://doi.org/10.12737/stp-82202213>
8. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeva G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2020, vol. 20, pp. ES6001. <https://doi.org/10.2205/2020ES000721>
9. Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, vol. 117, no. A9, pp. A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
10. Waters C.L., Gjerloev J.W., Dupont M., Barnes R.J. Global maps of ground magnetometer data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, vol. 120, no. 11, pp. 9651–9660. <https://doi.org/10.1002/2015JA021596>
11. Zhang H., Tian Y., Zhao P. Dispersion curve interpolation based on kriging method. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 2557. <https://doi.org/10.3390/app13042557>

12. Lebrez H., Bardossy A. Geostatistical interpolation by quantile kriging // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. V. 23. N 3. P. 1633–1648. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1633-2019>
13. Alexa M. Conforming weighted Delaunay triangulations // *ACM Transactions on Graphics*. 2020. V. 39. N 6. P. 1–16. <https://doi.org/10.1145/3414685.3417776>
14. Weng Y., Cao J., Chen Z. Global optimization of optimal Delaunay triangulation with modified whale optimization algorithm // *Engineering with Computers*. 2024. V. 40. N 4. P. 2595–2616. <https://doi.org/10.1007/s00366-023-01928-2>
15. Huynh T., Tran D., Vu Q., Nguyen L., Design and Implementation of Web Application Based on MVC Laravel Architecture // *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. V. 6. N 4. P. 1–7. <https://doi.org/10.24018/ejece.2022.6.4.448>
16. Rahman M.H., Naderuzzaman M., Kashem M.A., Salahuddin B.M., Mahmud M.Z. Comparative study: performance of MVC frameworks on RDBMS // *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2024. V. 16. N 1. P. 26–34. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2024.01.03>
17. Hule K., Ranawat R. Analysis of different ORM tools for data access object tier generation: a brief study // *International Journal of Membrane Science and Technology*. 2023. V. 10. N 1. P. 1277–1291. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i1.2842>
18. Marculescu B., Zhang M., Arcuri A. On the faults found in REST APIs by automated test generation // *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2022. V. 31. N 3. P. 1–43. <https://doi.org/10.1145/3491038>
19. Golmohammadi A., Zhang M., Arcuri A. Testing RESTful APIs: a survey // *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2023. V. 33. N 1. P. 1–41. <https://doi.org/10.1145/3617175>
20. Bogner J., Kotstein S., Pfaff T. Do RESTful API design rules have an impact on the understandability of Web APIs? // *Empirical Software Engineering*. 2023. V. 28. N 6. P. 132. <https://doi.org/10.1007/s10664-023-10367-y>
12. Lebrez H., Bardossy A. Geostatistical interpolation by quantile kriging. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 1633–1648. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1633-2019>
13. Alexa M. Conforming weighted Delaunay triangulations. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, vol. 39, no. 6, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1145/3414685.3417776>
14. Weng Y., Cao J., Chen Z. Global optimization of optimal Delaunay triangulation with modified whale optimization algorithm. *Engineering with Computers*, 2024, vol. 40, no. 4, pp. 2595–2616. <https://doi.org/10.1007/s00366-023-01928-2>
15. Huynh T., Tran D., Vu Q., Nguyen L., Design and Implementation of Web Application Based on MVC Laravel Architecture. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 1–7. <https://doi.org/10.24018/ejece.2022.6.4.448>
16. Rahman M.H., Naderuzzaman M., Kashem M.A., Salahuddin B.M., Mahmud M.Z. Comparative study: performance of MVC frameworks on RDBMS. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 26–34. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2024.01.03>
17. Hule K., Ranawat R. Analysis of different ORM tools for data access object tier generation: a brief study. *International Journal of Membrane Science and Technology*, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 1277–1291. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i1.2842>
18. Marculescu B., Zhang M., Arcuri A. On the faults found in REST APIs by automated test generation. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2022, vol. 31, no. 3, pp. 1–43. <https://doi.org/10.1145/3491038>
19. Golmohammadi A., Zhang M., Arcuri A. Testing RESTful APIs: a survey. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2023, vol. 33, no. 1, pp. 1–41. <https://doi.org/10.1145/3617175>
20. Bogner J., Kotstein S., Pfaff T. Do RESTful API design rules have an impact on the understandability of Web APIs? *Empirical Software Engineering*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 132. <https://doi.org/10.1007/s10664-023-10367-y>

Авторы

Воробьева Гульнара Равиелевна — доктор технических наук, доцент, профессор, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация, [sc 57189275619](https://orcid.org/0000-0001-7878-9724), <https://orcid.org/0000-0001-7878-9724>, gulnara.vorobeva@gmail.com

Воробьев Андрей Владимирович — доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация, [sc 56767909700](https://orcid.org/0000-0002-9680-5609), <https://orcid.org/0000-0002-9680-5609>, geomagnet@list.ru

Фарваев Эмиль Фанильевич — аспирант, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-4107-8950>, farvaev.emil@gmail.com

Authors

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

Andrei V. Vorobev — D.Sc., Associate Professor, Professor, Head of Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation, [sc 56767909700](https://orcid.org/0000-0002-9680-5609), <https://orcid.org/0000-0002-9680-5609>, geomagnet@list.ru

Emil F. Farvaev — PhD Student, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-4107-8950>, farvaev.emil@gmail.com

Статья поступила в редакцию 06.09.2024

Одобрена после рецензирования 18.11.2024

Принята к печати 22.01.2025

Received 06.09.2024

Approved after reviewing 18.11.2024

Accepted 22.01.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»