

Научная статья

УДК 004.95

doi: 10.17223/19988605/69/5

Элементы системного и вепольного анализа инфраструктуры мониторинга окружающей среды (на примере геомагнитных данных)**Гульнара Равиловна Воробьева¹, Андрей Владимирович Воробьев²,
Эмиль Фанильевич Фарваев³, Глеб Олегович Орлов⁴**^{1, 2, 3, 4} Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия² Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия¹ gulnara.vorobeva@gmail.com² geomagnet@list.ru³ farvaev.emil@gmail.com⁴ orlovgleb99@mail.ru

Аннотация. Принятие решений в области обеспечения техносферной безопасности базируется на своевременном получении актуальной и полной информации о состоянии окружающей среды. Геомагнитный мониторинг играет важную роль в сокращении негативного воздействия экстремальных геофизических событий на объекты и системы техносферы (линии электропередач, системы связи, автоматику железных дорог и пр.). В работе геомагнитный мониторинг рассмотрен с точки зрения системного подхода, идентифицированы и сформулированы основные проблемы получения геомагнитных данных, главной из которых является неполное покрытие сетью мониторинга. Предложен и с помощью вепольного представления формализован подход, дополняющий схему получения и использования данных интерполирующей компьютерной моделью. Реализация такой модели использует адаптивную пространственную интерполяцию для определения оптимальных методов интерполяции с учетом географического расположения интерполируемых точек и глобального индекса геомагнитной активности. Эффективность подхода продемонстрирована на примере геомагнитной информации проекта SuperMAG с помощью веб-ориентированного программного решения.

Ключевые слова: системный анализ; вепольный анализ; геомагнитные данные; пространственная интерполяция; поддержка принятия решений.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, проект № 21-77-30010.

Для цитирования: Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Фарваев Э.Ф., Орлов Г.О. Элементы системного и вепольного анализа инфраструктуры данных мониторинга окружающей среды (на примере геомагнитных данных) // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 69. С. 42–53. doi: 10.17223/19988605/69/5

Original article

doi: 10.17223/19988605/69/5

**Elements of system and Su-field analysis of environmental monitoring tools
(using the example of the geomagnetic data)****Gulnara R. Vorobeva¹, Andrei V. Vorobev², Emil F. Farvaev³, Gleb O. Orlov⁴**^{1, 2, 3, 4} Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation² Geophysical Center of RAS, Moscow, Russian Federation¹ gulnara.vorobeva@gmail.com² geomagnet@list.ru

³farvaev.emil@gmail.com

⁴orlovgleb99@mail.ru

Abstract. Decision-making in the field of technosphere safety is based on timely receipt of up-to-date and complete information about the state of the environment. Geomagnetic monitoring plays an important role in reducing the negative impact of extreme geophysical events on objects and systems of the technosphere (power lines, communication systems, railway automation, etc.). In this paper, geomagnetic monitoring is considered from the point of view of system approach, the main problems of obtaining geomagnetic data are identified and formulated, the main of which is incomplete coverage by the monitoring network. Using a Su-field representation, an approach is proposed and formalized, that extends the process of obtaining and using data with an interpolating computer model. The implementation of this model uses adaptive spatial interpolation to determine the optimal interpolation methods, taking into account the geographical location of the interpolated points and the global geomagnetic activity index. The effectiveness of the approach is demonstrated by the example of the geomagnetic information of the SuperMAG project using a web-based software solution.

Keywords: system analysis, Su-field analysis, geomagnetic data, spatial interpolation, decision support.

Acknowledgments: The reported study was funded by RSF, project number 21-77-30010.

For citation: Vorobeve, G.R., Vorobev, A.V., Farvaev, E.F., Orlov, G.O. (2024) Elements of system and Su-field analysis of environmental monitoring tools (using the example of the geomagnetic data). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 69. pp. 42–53. doi: 10.17223/19988605/69/5

Введение

В настоящее время наблюдается активное развитие систем поддержки принятия решений, базирующихся на применении геопространственных данных различного прикладного назначения. Примером таких данных являются результаты наблюдения геомагнитного поля и его вариаций, необходимые для обеспечения безопасности эксплуатации объектов и систем техносферы в условиях экстремальной геофизической обстановки [1, 2]. Если условия в соответствующем регионе не располагают к размещению магнитометрических измерительных устройств (что часто бывает, к примеру, в суровых условиях арктического региона планеты), то и получить такую информацию и предпринять соответствующее превентивное действие принимающему решению не представляется возможным. Иными словами, наблюдается дефицит необходимых для принятия решения данных.

Представляется целесообразным рассмотреть задачу мониторинга параметров геомагнитного поля и его вариаций с позиций системного анализа, представить отдельные источники данных в их взаимосвязи с единой точкой входа для потребителей геомагнитных данных с варьируемым шагом дискретизации для сети мониторинга. Фактически предполагается, что данные по параметру геомагнитного поля должны быть получены в любой пространственной точке независимо от физического наличия здесь 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.

1. Системный анализ задачи геомагнитного мониторинга

В общем виде рассмотрение системы геомагнитного мониторинга как совокупности элементов и подсистем позволяет использовать для ее математического описания теоретико-множественный аппарат (рис. 1) [3, 4]. Если обозначить систему геомагнитного мониторинга как S , то имеем:

$$S = \{m_1, m_2, \dots, m_N\},$$

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

Множество прошедших обработку данных обозначим как D . Целевой по отношению к системе S будет являться функция, задающая правила отображения множества S в множество D (получение геомагнитных данных по результатам геомагнитного мониторинга):

$$f : S \rightarrow D : D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\},$$

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

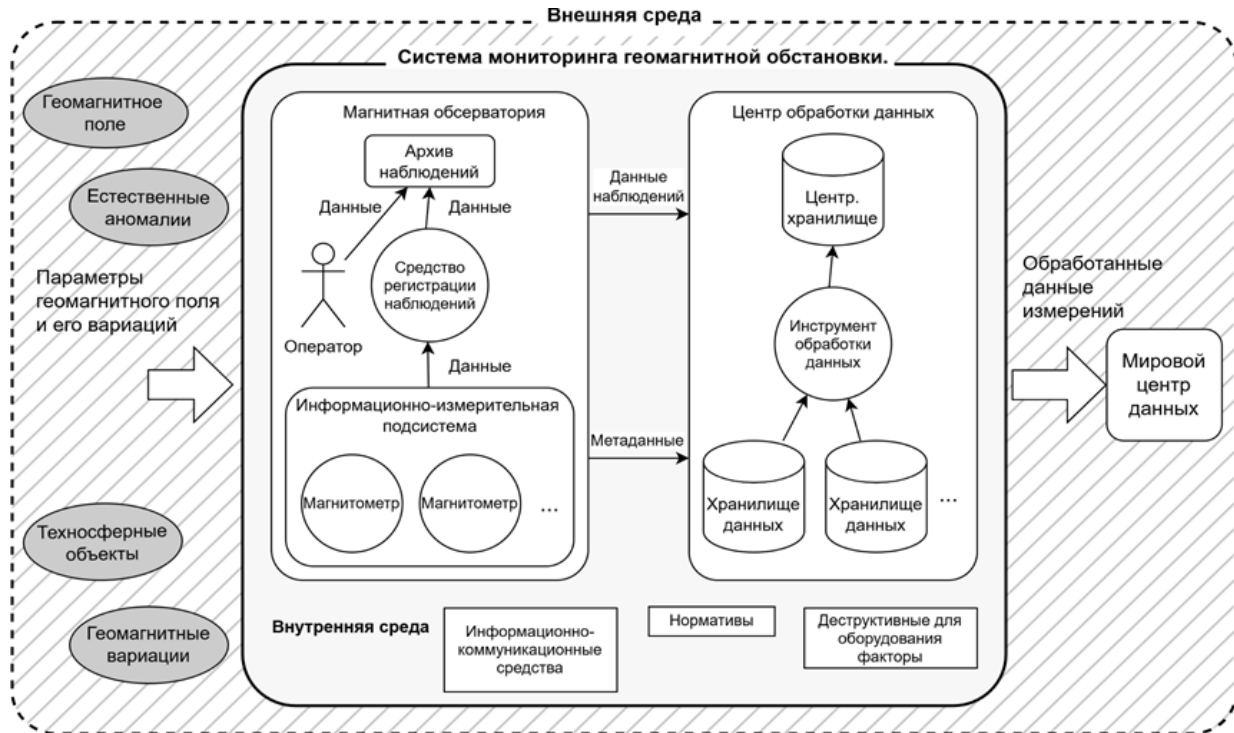


Рис. 1. Представление геомагнитного мониторинга с точки зрения принципов системного анализа
Fig. 1. Presentation of geomagnetic monitoring from the point of view of the principles of system analysis

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

$$f : S \rightarrow D : f_i : m_i \rightarrow d_i; f_i = g_i(p_i, t_i, F_{in}, F_{out});$$

$$p_i \supset (lat_i, lng_i), i = 1, \dots, N,$$

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

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

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

где p_k – пространственная точка, для которой необходимо определить параметры геомагнитного поля, но при этом отсутствует магнитная обсерватория, на которой осуществляется регистрация параметров геомагнитного поля и его вариаций.

Соответственно, потребитель геомагнитной информации сталкивается с проблемой дефицита искомых результатов мониторинга параметров геомагнитного поля и его вариаций. В результате невозможно принимать адекватные решения в той или иной области (и особенно в области обеспечения техносферной безопасности), которые напрямую или косвенно зависят от соответствующей геомагнитной обстановки. Если при этом геомагнитные параметры являются одним из компонент информационной поддержки принятия решений, то даже наличие других ее составляющих может привести к серьезным последствиям, в том числе экономическим.

В случае кратковременного отсутствия геомагнитных данных в отдельных случаях возможно их восстановление известными статистическими методами интерполяции временных рядов. Однако в том случае, когда источника данных пространственно не существует, либо пропуски по длительности своей весьма существенны, указанные методы теряют свою эффективность, а полученные на их основе геомагнитные данные могут привести к принятию неверных решений, что особенно критично в области обеспечения техносферной безопасности сложных объектов и систем.

Соответственно необходимо решение, которое позволит оценивать геомагнитную обстановку в условиях дефицита результатов регистрации параметров геомагнитного поля и его вариаций. При этом искомые данные должны учитывать весь комплекс внутренних и внешних факторов, способных оказывать на них негативное искажающее влияние.

2. Вепольный анализ задачи геомагнитного мониторинга

Дальнейшее исследование предполагает рассмотрение потенциальной системы геомагнитного мониторинга с позиций воздействия одних ее компонент на другие (при наличии) для выявления новых / подтверждения уже выявленных проблем при решении соответствующей задачи (рис. 2).

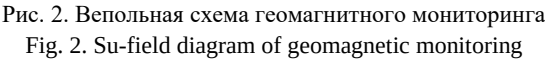
Непосредственно информационно-измерительная система и геомагнитные данные в терминах вепольного анализа рассматриваются как варианты вещества [5, 6]. Преобразование вещества В1 (информационно-измерительная система) в вещество В2 (геомагнитные данные) осуществляется под воздействием геомагнитного поля (П1), параметры которого непосредственно регистрируются приборами и переводятся после некоторых преобразований в геомагнитные данные:

$$B2 \Rightarrow P1 \rightarrow B1 \rightarrow B2.$$

Фактически имеет место комплексная система, построенная в виде совокупности простых веполей, при этом рассматривается одновременно несколько веществ и энергий в своей взаимосвязи. Данная структура полностью соответствует особенностям пространственно-временной динамики значений параметров геомагнитного поля и его вариаций, что обусловлено комплексным воздействием на измеряемые параметры группы внешних и внутренних факторов (в редких случаях наблюдается воздействие единственного фактора, что является, скорее, исключением).

На более высоком уровне абстракции представляется целесообразным рассмотреть выделенные веполи как особый тип веполей, применяемых для задач на измерение параметров или обнаружение объектов. Если в таком случае представить информационно-измерительную систему как вещество В1, а геомагнитные данные – как вещество В2, то возможно говорить о применении В2 как индикатора существования полей, воздействующих на В1 (непосредственно геомагнитное поле, его вариации, обусловленные различными факторами и пр.).

Здесь представляется целесообразным отметить наличие в рассматриваемой системе так называемых вредных связей. К таковым относятся поля, которые негативно воздействуют на соответствующее вещество, искажая формируемый при этом результат. Причем в рассматриваемом случае негативное воздействие от вредных связей проявляется не только в отношении некоторого вещества, но также и касательно некоторых полей, которые, в свою очередь, оказывают воздействие на исходное вещество в процессе формирования искомого вещества (см. рис. 2).


$$B2 \Rightarrow (\Pi 1 + \Pi'_{\text{внеш}} + \Pi'_{\text{внут}}) \rightarrow B1 \rightarrow B2:$$

где $P_{\text{внеш}}$ и $P_{\text{внутр}}$ – поля, соответствующие внешним и внутренним факторам; $P_{\text{чф}}$, $P_{\text{кп}}$ и $P_{\text{тф}}$ – человеческий фактор, космическая погода и техногенные факторы, в совокупности составляющие поле $P_{\text{внеш}}$; $P_{\text{га}}$ и $P_{\text{пр}}$ – геомагнитные аномалии и прочие факторы, в совокупности составляющие поле $P_{\text{внутр}}$.

Дополненная схема представляет расширенный и форсированный веполь, поскольку содержит дополнительный элемент, призванный сократить или полностью исключить негативное воздействие внешних и внутренних факторов на результирующие геомагнитные данные. Так, в частности, в обозначенную вепольную структуру добавлена компьютерная модель, которая наряду с информационно-измерительной системой участвует в формировании результирующих геомагнитных данных. Модель представлена двумя ключевыми подсистемами обработки геомагнитных данных, а именно подсистемами фильтрации для очистки данных и интерполяции для их восстановления.

46

ции. Компьютерная модель обеспечивает при этом приведение результирующих геомагнитных данных к единому формату с заданным шагом дискретизации с использованием одних и тех же единиц измерения параметров геомагнитного поля и его вариаций.

3. Описание предлагаемой компьютерной модели

По сути, виртуальная магнитная обсерватория / вариационная станция в общем случае представляет собой компьютерную модель, которая дополняет известные результаты наблюдений и на их основе прогнозирует отсутствующие во времени и / или пространстве значения. Иными словами, в нашем случае речь идет именно об интерполяции геомагнитных данных в некоторой геопространственной точке, по которой по тем или иным причинам (человеческий или техногенный фактор, проявления экстремальной космической погоды, отсутствие средства измерения в точке и пр.) отсутствуют данные измерений параметров геомагнитного поля и его вариаций.

Представляется целесообразным использовать специфику пространственно-временного распределения параметров геомагнитного поля и его вариаций, а также их зависимость от различных внешних и внутренних факторов для получения наилучшего с точки зрения минимизации ошибки восстановления данных метода интерполяции [7, 8]. С этой целью авторами был проведен ряд вычислительных экспериментов, которые при разном сочетании внешних и внутренних факторов обеспечивали восстановление пространственно-временного ряда геомагнитных данных. При этом вычислительные эксперименты были проведены для условных трех пространственных групп восстанавливаемых геомагнитных данных, разделенных по своей широтной принадлежности на высокоширотные, низкоширотные и приэкваториальные области наблюдений. Для достижения поставленной цели определения наиболее эффективного с учетом всех возможных факторов метода пространственной интерполяции были проанализированы результаты геомагнитных наблюдений за 3 календарных года, полученные магнитными обсерваториями и вариационными станциями по всему миру и доступными посредством API, обеспечивающего обращение к геомагнитным данным проекта SuperMAG (URL: <https://supermag.jhuapl.edu/mag/>) [9, 10].

В общем виде для пространственной интерполяции пространственные регионы были разделены на три группы, определенные спецификой пространственного распределения параметров геомагнитного поля: по мере приближения к экватору и полюсам число факторов, влияющих на результаты наблюдений, возрастает (к примеру, кольцевые токи на экваторе и суббури в полярных областях), что, в свою очередь, приводит к росту неопределенности данных о состоянии геомагнитного поля и его вариаций, а также повышает вероятность резкого «скачкообразного» изменения соответствующих уровней временных рядов [3, 5, 9]. В качестве дополнительного фактора был определен индекс геомагнитной активности, характеризующий геомагнитную обстановку в соответствии с параметрами космической погоды. Известно, что в периоды высокой геомагнитной активности, обусловленной экстремальными проявлениями космической погоды, геомагнитные вариации наиболее выражены по сравнению со своими значениями в магнитоспокойные периоды [4, 8, 9].

Анализ эффективности методов пространственной интерполяции был проведен для каждой из выделенных пространственных областей по имеющимся годовым геомагнитным данным, регистрируемым магнитными обсерваториями и станциями с шагом в 1 мин (таблица). Для простоты в работе приведены результаты исследований по одному из компонент вектора геомагнитного поля (горизонтальная составляющая), однако было установлено, что полученные заключения справедливы и для остальных параметров вектора геомагнитного поля. Для проведения вычислительных экспериментов из исходных данных на каждом этапе изымалась одна пространственная точка, атрибутивное значение в которой было рассмотрено как неизвестное и требующее вычисления методами интерполяции. Далее полученный результат сравнивался с оригинальным значением.

При пространственной интерполяции высокоширотных геомагнитных данных наилучшие результаты были получены при применении метода кригинга [11, 12]. В его основе лежит вариограмма, характеризующая пространственную модель известных (опорных) пространственных точек. Каждой

опорной пространственной точке присваивается свой весовой коэффициент, значение которого тем больше, чем ближе известная точка расположена (территориально) по отношению к интерполируемой [11].

В общем виде вычисление атрибутивного значения $Z^*(x_0, y_0)$ в точке (x_0, y_0) по известным n атрибутивным значениям опорных точек $Z(x_i, y_i)$ может быть представлено регрессионным выражением [11]

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

где $m(x_i, y_i)$ и $m(x_0, y_0)$ – математическое ожидание для $Z(x_i, y_i)$ и $Z(x_0, y_0)$ соответственно.

При этом было установлено, что в условиях спокойной магнитосферы наиболее эффективна пространственная интерполяция посредством простого кригинга. В этом случае предполагается, что среднее значение опорных пространственных точек постоянно и известно на всей области исследования ($m(z) = m = \text{const}$ для всех z):

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

**Результаты вычислительных экспериментов
по исследованию методов интерполяции геомагнитных данных**

Пространственные регионы	Геомагнитная активность	Методы интерполяции, значение среднеквадратической ошибки [нТл]									
		Линейная интерполяция	Метод обратно взвешенных расстояний	Полиномиальная регрессия	Триангуляция Делоне	Кригинг	Метод Шепарда	Радиальная интерполяция	Метод градиентных плоскостей	Метод сплайнов	Метод трендов
Высокоширотные	Нет	3,23	5,56	2,98	1,82	1,6	5,56	3,18	4,14	5,12	4,98
	Слабая буря	4,16	6,12	3,12	2,19	1,89	6,12	4,78	6,29	7,15	6,89
	Сильная буря	5,32	8,45	7,15	3,45	2,51	8,45	6,97	7,15	9,12	8,97
Приэкваториальные	Нет	1,2	1,51	1,78	0,17	0,54	1,51	3,21	4,78	5,97	5,3
	Слабая буря	2,5	4,8	2,41	0,65	0,97	4,8	4,86	5,9	5,95	6,3
	Сильная буря	3,1	5,73	5,53	1,31	1,35	5,73	12,1	10,4	11,5	11,9
Низкоширотные	Нет	18,6	17,12	10,15	0,22	7,36	17,12	10,6	11,8	12,1	11,78
	Слабая буря	22,19	20,45	15,92	2,12	10,12	20,45	15,8	16,2	16,98	16,45
	Сильная буря	40,1	28,34	27,6	3,5	12,7	28,34	28,7	28,9	27,6	25,1

В условиях неспокойной магнитосферы наилучшие показатели пространственной интерполяции показал метод универсального кригинга с константной функцией (так называемый кригинг с трендом) [11]. Тренд при этом задается как линейная комбинация известных базисных функций $f_k(x_0, y_0)$ с коэффициентами β_k . Последние, в свою очередь, неизвестны и постоянны внутри окрестности оцениваемой точки (x_0, y_0) :

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

Для низкоширотных и приэкваториальных регионов наилучшие результаты пространственной интерполяции были получены с помощью триангуляция Делоне [13, 14]. Для опорных пространственных точек с координатами (X, Y) и атрибутивным значением вида $Z = Z(X, Y)$ построение триангуляции Делоне $DT(S)$ может быть представлено следующим образом. Требуется построить треугольник, образованный опорными пространственными точками S_1, S_2, S_3 и содержащий искомую (интерполируемую) точку. Необходимо определить уравнение плоскости того треугольника, который

включает искомую точку. В общем виде уравнение плоскости содержит четыре неизвестных коэффициента a, b, c, d :

$$a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z + d = 0.$$

Указанные коэффициенты определяются следующими соотношениями:

$$a = Y_1(Z_2 - Z_3) + Y_2(Z_3 - Z_1) + Y_3(Z_1 - Z_2),$$

$$b = Z_1(X_2 - X_3) + Z_2(X_3 - X_1) + Z_3(X_1 - X_2),$$

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

$$d = X_1(Y_2Z_3 - Y_3Z_2) + X_2(Y_3Z_1 - Y_1Z_3) + X_3(Y_1Z_2 - Y_2Z_1),$$

где $X_1, Y_1, X_2, Y_2, X_3, Y_3$ – координаты соответствующих точек S_1, S_2, S_3 ; Z_1, Z_2, Z_3 – значения параметров магнитного поля соответствующих точек S_1, S_2, S_3 .

Соответственно, искомая величина $Z^*(X_0, Y_0)$ может быть получена в соответствии с уравнением

$$Z^*(x_0, y_0) = \frac{-a \cdot X_0 - b \cdot Y_0 - d}{c},$$

где a, b, c, d – найденные коэффициенты из уравнения плоскости; X_0, Y_0 – координаты интерполируемой пространственной точки.

С учетом сказанного предлагается следующий алгоритм динамического подбора методов интерполяции (рис. 3):

1. Проведение серии вычислительных экспериментов для определения эффективности разных методов в разных областях (низкие, средние и высокие широты) и при различных внешних факторах (в случае геомагнитных данных – индекс геомагнитной активности).

2. Основанная на результатах экспериментов подготовка пула методов.

3. При поступлении запроса на интерполяцию значения в некоторой точке в заданный момент времени выполнение интерполяции, выбрав метод на основе принадлежности точки определенной пространственной области и степени влияния внешних факторов в указанный момент времени.

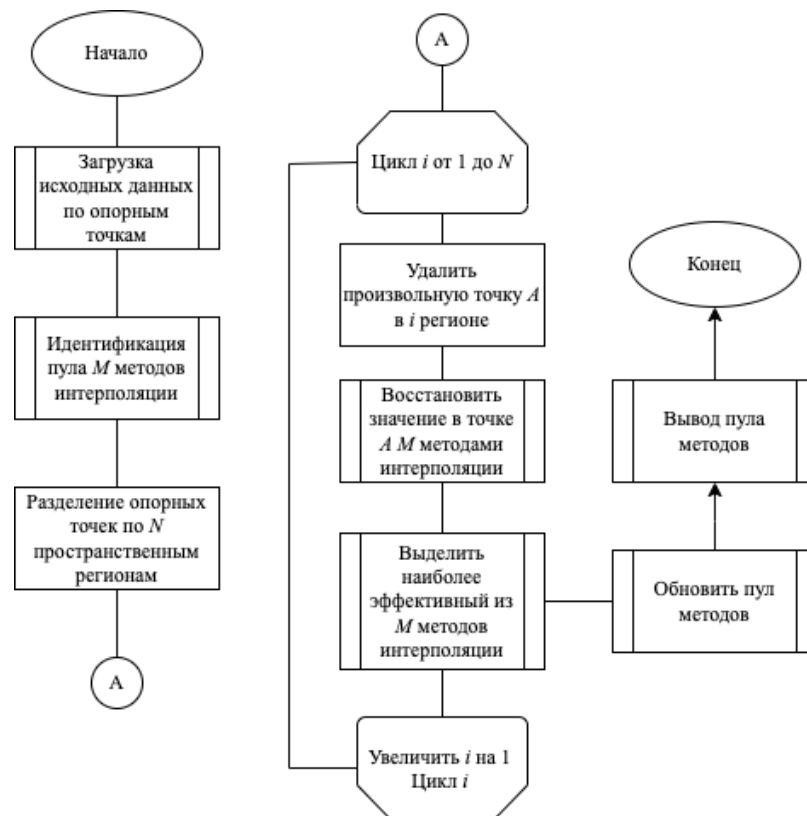


Рис. 3. Алгоритм адаптивной интерполяции
Fig. 3. Adaptive interpolation algorithm

4. Описание и апробация предлагаемого подхода

Предложенный подход был программно реализован в рамках веб-ориентированного исследовательского прототипа приложения, обеспечивающего пространственную интерполяцию и визуализацию геомагнитных данных на основании доступных результатов, полученных наземными магнитными обсерваториями. В общем виде архитектура разработанного веб-приложения и его экранная форма приведены на рис. 4.

В качестве инструмента реализации был выбран Python, что обусловлено опытом авторов в обработке геопространственных данных, а также внушительной базой инструментария для анализа данных, разрабатываемого и поддерживаемого для данного языка программирования. Реализация серверных сценариев использует архитектурный шаблон MVC (Model–View–Controller), который разделяет приложение на три компонента: модель, представление и контроллер. MVC позволяет разработчикам сосредоточиться на отдельных аспектах приложения во время разработки [15, 16].

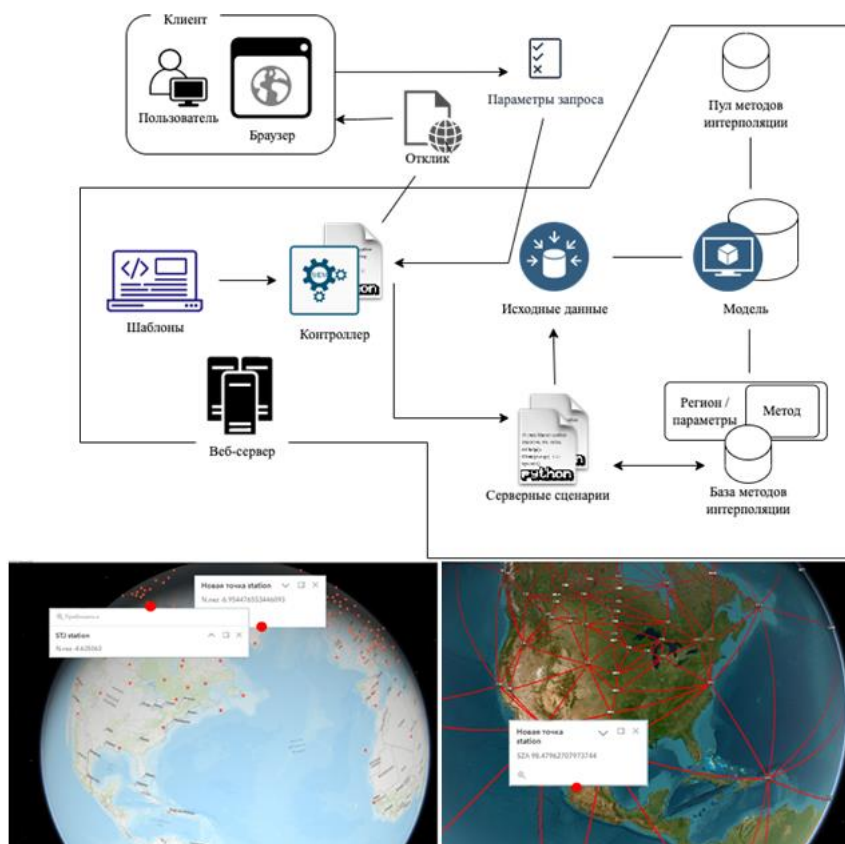


Рис. 4. Архитектура и экранные формы предлагаемого решения
Fig. 4. Architecture and screen forms of the proposed solution

Модель (Model) является объектно-ориентированным отображением данных предметной области и применяется, в частности, в качестве модели ORM при взаимодействии с реляционными базами данных [17]. Контроллер (Controller) взаимодействует с данными (моделью), принимая запросы от клиента, обрабатывая их и формируя результаты. Компонент представления (View) можно рассматривать как опциональный, так как решение представляет наибольший интерес и практическую пользу как удаленная функция для вычисления интерполированного значения.

Функциональность приложения была реализована в двух формах. С одной стороны, представление обеспечивает передачу HTML-разметки с программными компонентами для визуализации результатов в браузере. С другой стороны, предусмотрена возможность взаимодействия с серверной частью через RESTful API, позволяющая сторонним приложениям запрашивать интерполированные данные, отправляя сервису запрос с входными параметрами [18, 19, 20].

Для оценки эффективности предложенного решения проблемы пространственной интерполяции геомагнитных данных был создан исследовательский прототип веб-приложения. Для каждого метода интерполяции был разработан свой серверный модуль, а также создан серверный сценарий, выбирающий наиболее эффективный метод интерполяции.

Эксперименты проводились на клиентской стороне с использованием компьютера с процессором Intel Core i5 10300H 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 оценивалось время 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 требованиям к высокопроизводительным веб-приложениям.

На втором этапе оценивалась ошибка пространственной интерполяции при использовании предложенного адаптивного подхода в сравнении с существующими методами. Исследования проводились на геомагнитных данных в разные периоды геомагнитной активности и для разных пространственных областей: средне-, высоко- и низкоширотных.

Анализ полученных результатов показал, что использование предложенного адаптивного подхода к пространственной 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

Современные инструменты мониторинга геомагнитного поля включают наземные обсерватории, станции и спутники. Системный подход рассматривает геомагнитный мониторинг как систему элементов, работающих под воздействием внешних и внутренних факторов, которая формирует результирующие магнитные данные, направляемые в надсистему – центр данных, а далее – заинтересованным лицам. Вепольный анализ, проведенный в рамках работы, выявил основные проблемы получения геомагнитных данных, в частности проблему отсутствия данных в некоторых точках земной поверхности.

Разработанная концепция предлагает введение дополнительных компьютерных моделей в систему поддержки принятия решений на основе геомагнитной информации таким образом, чтобы обеспечить получение данных о геомагнитной обстановке в том числе и в тех точках, где отсутствуют или недоступны средства измерения. Предложен подход, комбинирующий методы интерполяции с наименьшей ошибкой для разных условий. На подготовительном этапе для каждого метода оценивается ошибка интерполяции для разных областей и внешних факторов. При дальнейшей интерполяции определяется принадлежность искомой точки одной из пространственных областей, оцениваются внешние факторы и выбирается оптимальный метод интерполяции. Эффективность предложенного решения показана на примере геомагнитной информации для разных широт и уровней активности Кр-индекса.

Список источников

1. Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Sakharov Y. An Approach to Diagnostics of Geomagnetically Induced Currents Based on Ground Magnetometers Data // Appl. Sci. 2022. V. 12. Art. 1522. doi: 10.3390/app12031522
2. Vorobev A.V., Vorobeva G.R. Approach to Assessment of the Relative Informational Efficiency of Intermagnet Magnetic Observatories // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. P. 625–628. doi: 10.1134/S0016793218050158
3. Кориков А.М., Павлов С.Н. Теория систем и системный анализ. М. : ИНФРА-М, 2024. 288 с.
4. Imboden D., Pfenninger S. Introduction to Systems Analysis Mathematically Modeling Natural Systems. Berlin,; Spinger, 2012. 252 p.
5. Петров В. Структурный анализ систем. Вепольный анализ. ТРИЗ. Екатеринбург : Издательские решения, 2018. 280 с.

6. Гареев Р.Т. Эвристические приемы ТРИЗ. М. : МГИУ, 2008. 134 с.
7. Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeve G.R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis // *Solar-Terrestrial Physics*. 2022. V. 8 (2). P. 84–90. doi: 10.12737/stp-82202213
8. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeve G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology // *Russ. J. Earth Sci.* 2020. V. 20. Art. ES6001. doi: 10.2205/2020ES000721
9. Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Art. A09213.
10. Waters C.L., Gjerloev J.W., Dupont M., Barnes R.J. Global maps of ground magnetometer data // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2015. V. 120. P. 9651–9660. doi:10.1002/2015JA021596
11. Zhang H., Tian Y., Zhao P. Dispersion Curve Interpolation Based on Kriging Method // *Applied Sciences*. 2023. V. 13 (4). Art. 2557. doi: 10.3390/app13042557
12. Lebrezn H., Bardossy A. Geostatistical interpolation by quantile kriging // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. V. 23. P. 1633–1648. doi: 10.5194/hess-23-1633-2019
13. Alexa M. Conforming weighted Delaunay triangulations // *ACM Transactions on Graphics*. 2020. V. 39. P. 1–16. doi: 10.1145/3414685.3417776
14. Weng Y., Cao J., Chen Zh. Global optimization of optimal Delaunay triangulation with modified whale optimization algorithm // *Engineering with Computers*. 2024. V. 40. P. 1–22. doi: 10.1007/s00366-023-01928-2
15. Nguyen L. et al. Design and Implementation of Web Application Based on MVC Laravel Architecture // *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. V. 6. P. 23–29. doi: 10.24018/ejece.2022.6.4.448
16. Rahman M.H., Naderuzzaman M., Kashem M.A. et al. Comparative Study: Performance of MVC Frameworks on RDBMS // *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*. 2024. V. 16 (1). P. 26–34. doi: 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. P. 1277–1291. doi: 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. P. 1–43. doi: 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 (1). Art. 27. doi: 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 (6). Art. 132. doi: 10.1007/s10664-023-10367-y

References

1. Vorobev, A., Soloviev, A., Pilipenko, V., Vorobeve, G. & Sakharov, Y. (2022) An Approach to Diagnostics of Geomagnetically Induced Currents Based on Ground Magnetometers Data. *Applied Sciences*. 12. pp. 1522. DOI: 10.3390/app12031522
2. Vorobev, A.V. & Vorobeve, G.R. (2018) Approach to Assessment of the Relative Informational Efficiency of Intermagnet Magnetic Observatories. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58. pp. 625–628. DOI: 10.1134/S0016793218050158
3. Korikov, A.M. & Pavlov, S.N. (2024) *Systems theory and systems analysis*. Moscow: INFRA-M.
4. Imboden, D. & Pfenninger, S. (2012) *Introduction to Systems Analysis Mathematically Modeling Natural Systems*. Berlin: Springer.
5. Petrov, V. (2018) *Strukturnyy analiz sistem. Vepol'nyy analiz. TRIZ* [Structural Analysis of Systems. Su-field analysis. TRIZ]. Ekaterinburg: Izdatel'skie resheniya.
6. Gareev, R.T. (2008) *Evristicheskie priemy TRIZ* [Heuristic Techniques of TRIZ]. Moscow: MGIU.
7. Vorobev, A.V., Soloviev, A.A., Pilipenko, V.A. & Vorobeve, G.R. (2022) Interactive computer model for aurora forecast and analysis. *Solar-Terrestrial Physics*. 8(2). pp. 84–90. DOI: 10.12737/stp-82202213
8. Vorobev, A.V., Pilipenko, V.A., Krasnoperov, R.I., Vorobeve, G.R. & Lorentzen, D.A. (2020) Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology. *Russian Journal of Earth Sciences*. 20. P. ES6001. DOI: 10.2205/2020ES000721
9. Gjerloev, J.W. (2012) The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research*. 117. A09213.
10. Waters, C.L., Gjerloev, J.W., Dupont, M. & Barnes, R.J. (2015) Global maps of ground magnetometer data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 120. pp. 9651–9660. DOI: 10.1002/2015JA021596
11. Zhang, H., Tian, Y. & Zhao, P. (2023) Dispersion Curve Interpolation Based on Kriging Method. *Applied Sciences*. 13(4). 2557. DOI: 10.3390/app13042557
12. Lebrezn, H. & Bardossy, A. (2019) Geostatistical interpolation by quantile kriging. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23. pp. 1633–1648. DOI: 10.5194/hess-23-1633-2019
13. Alexa, M. (2020) Conforming weighted Delaunay triangulations. *ACM Transactions on Graphics*. 39. pp. 1–16. DOI: 10.1145/3414685.3417776
14. Weng, Y., Cao, J. & Chen, Zh. (2024) Global optimization of optimal Delaunay triangulation with modified whale optimization algorithm. *Engineering with Computers*. 40. pp. 1–22. DOI: 10.1007/s00366-023-01928-2
15. Nguyen, L. et al. (2022) Design and Implementation of Web Application Based on MVC Laravel Architecture. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 6. pp. 23–29. DOI: 10.24018/ejece.2022.6.4.448

16. Rahman, M.H., Naderuzzaman, M., Kashem, M.A. et al. (2024) Comparative Study: Performance of MVC Frameworks on RDBMS. *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*. 16(1). pp. 26–34. DOI: 10.5815/ijitcs.2024.01.03
17. Hule, K. & Ranawat, R. (2023) Analysis of Different ORM Tools for Data Access Object Tier Generation: A Brief Study. *International Journal of Membrane Science and Technology*. 10. pp. 1277–1291. DOI: 10.15379/ijmst.v10i1.2842
18. Marculescu, B., Zhang, M. & Arcuri, A. (2022) On the Faults Found in REST APIs by Automated Test Generation. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 31. pp. 1–43. DOI: 10.1145/3491038
19. Golmohammadi, A., Zhang, M. & Arcuri, A. (2023) Testing RESTful APIs: A Survey. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 33(1). Art. 27. DOI: 10.1145/3617175
20. Bogner, J., Kotstein, S. & Pfaff, T. (2023) Do RESTful API design rules have an impact on the understandability of Web APIs? *Empirical Software Engineering*. 28(6). Art. 132. DOI: 10.1007/s10664-023-10367-y

Информация об авторах:

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

Воробьев Андрей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики Института математики, информатики и робототехники Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия); научный сотрудник Геофизического центра Российской академии наук (Москва, Россия). E-mail: geomagnet@list.ru

Фарваев Эмиль Фанильевич – аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики Института математики, информатики и робототехники Уфимского университета науки и технологий (Уфа, Россия). E-mail: farvaev.emil@gmail.com

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

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

Information about the authors:

Vorobeva Gulnara Ravilevna (Doctor of Technical Sciences, Professor, Computational Mathematics and Cybernetics Institute of Mathematics, Informatics and Robotics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com

Vorobev Andrei Vladimirovich (Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of The Informatics Department of Institute of Mathematics, Informatics and Robotics Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation; Researcher, Geophysical Center of RAS, Moscow, Russian Federation). E-mail: geomagnet@list.ru

Farvaev Emil Fanilievich (Post-graduate Student, Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Institute of Mathematics, Informatics and Robotics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation). E-mail: farvaev.emil@gmail.com

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

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

Поступила в редакцию 25.09.2024; принята к публикации 02.12.2024

Received 25.09.2024; accepted for publication 02.12.2024