

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ АГРЕГИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ (НА ПРИМЕРЕ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ)

А. В. ВОРОБЬЕВ

Аннотация. В статье представлены результаты разработки методологических основ обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений для повышения их эффективности в условиях низкой ситуационной осведомленности на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнитных данных). Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести идентификацию и анализ проблемы обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений (на примере высокоширотных геомагнитных данных), а также предложить адаптированный комплекс параметров для оценки показателей надежности источников такого рода информации; разработать и формализовать в теоретико-множественном базисе концепцию обработки распределенной пространственной информации в условиях низкой ситуационной осведомленности (на примере геомагнитных данных) в системах поддержки принятия решений на основе технологии агрегированных цифровых двойников сложных технических объектов, а также предложить подход к кластеризации ее источников; разработать комплекс математических моделей, методов и алгоритмов, которые в соответствии с предложенной концепцией реализуют обработку, анализ и ретроспективный прогноз распределенной пространственной информации, получаемой с выхода разнородных цифровых и физических двойников; разработать комплекс функциональных подсистем обработки и динамической мультимасштабной визуализации распределенной пространственной информации, получаемой с выхода агрегированных цифровых двойников и их физических прототипов (на примере спутниковых данных, магнитных обсерваторий и вариационных станций); разработать экспериментальный прототип проблемно-ориентированной отраслевой системы поддержки принятия решений, функционально связанный с системой агрегированных цифровых двойников, обеспечивающий повышение эффективности поддержки принятия решений при эксплуатации сложных пространственно-распределенных технических систем высокоширотной инфраструктуры; выполнить анализ эффективности предложенных концепции, моделей, методов и алгоритмов, в совокупности представляющих методологические основы обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений в условиях низкой ситуационной осведомленности.

Ключевые слова: цифровые двойники; распределенная пространственно-временная информация; гетерогенные источники данных; обработка информации; низкая ситуационная осведомленность.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема модернизации методологических основ обработки распределенной пространственной информации в системах поддержки принятия решений в условиях низкой ситуационной осведомленности стоит перед современным обществом достаточно остро, что подтверждается п. 13 «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем» и п. 19 «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения» Перечня критических технологий Российской Федерации, а также п. 20, а «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта» Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [1].

Здесь и далее под распределенной пространственной информацией в соответствии с ГОСТ 52438-2005 понимаются наборы данных о пространственных объектах, то есть объектах, имеющих географическую привязку.

Решение данной проблемы в значительной степени обеспечивает технологический базис для реализации актуальных стратегий государства (например, таких как «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности») и во многом определяет возможность эффективной реализации Государственных программ (например, Государственная программа «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации»). Однако уверенное продвижение в заданном направлении часто сопряжено с принятием эффективных управленческих решений в условиях низкой ситуационной осведомленности. При этом под низкой ситуационной осведомленностью понимаются как систематическое отсутствие актуальных данных, их фрагментарность, так и окончательно несформировавшееся понимание физических механизмов воздействия окружающей среды на сложные технические системы, например, системы коротковолновой радиосвязи, спутниковой и подземной навигации; трубопроводы, линии электропередач, системы сигнальной автоматизации высокоширотных железных дорог и пр. [2].

Так, ярким примером принятия решений в условиях низкой ситуационной осведомленности являются процессы оценки и прогнозирования чрезвычайных ситуаций в техносфере на основании данных систем наблюдения параметров геомагнитного поля (ГМП) и его вариаций, основным элементом которых являются магнитные вариационные станции. Помимо пространственной и временной анизотропии источников такого рода информации, реализуемый подход сопряжен с человеческим фактором, что также негативно сказывается на его эффективности. Усугубляет проблему и то, что число источников и объемы генерируемой информации непрерывно растут. Так, по данным ресурса SuperMAG (крупнейшего агрегатора геомагнитных данных), на сегодняшний день существует более 500 наземных магнитных станций, неравномерно распределенных по поверхности Земли, объединенных в сети и осуществляющих регистрацию параметров ГМП в режиме реального времени. По состоянию на 2021 г., известно более 20 таких сетей, наиболее крупными из которых являются INTERMAGNET, IMAGE, CARISMA, MACCS и др.

С точки зрения конечного пользователя, сети магнитных станций представляют собой информационные системы, обеспечивающие доступ к геомагнитным данным и обладающие базовым для их поиска, предварительного просмотра и загрузки инструментарием [3].

Пропуски, выбросы и аномалии во временных рядах получаемых таким образом пространственных данных, которые, как показывает практика, по своему объему нередко превышают 30 % от общего числа зарегистрированных значений, крайне негативно отражаются на эффективности реализуемого подхода, исключают возможность применения к данным такого рода математического аппарата, требующего соблюдения условия непрерывности временного ряда, создают ощутимые проблемы при моделировании пространственного распределения вариаций ГМП и связанной с ними экспериментальной информации высокого уровня, могут привести к ошибочному пониманию сложившейся ситуации и, как следствие, к принятию решений, сопряженных со снижением уровня техносферной безопасности, экономическим и экологическим ущербом.

Отдельно следует выделить источники данных, располагающиеся и функционирующие в труднодоступных отдаленных регионах с характерными им экстремальными и малоизученными условиями окружающей среды (например, в арктической зоне), размах значений между критериями неопределенности (например, Вальда и максимакса) для которых значительно выше, а ситуационная осведомленность ниже.

Усугубляет данную ситуацию и то, что использование физических измерительных станций в непосредственной близости от целевых технических систем (магистральные трубопроводы, линии электропередач, объекты железнодорожной и нефтегазодобывающей инфраструктуры

и т. п.), представляющих собой массивные ферромагнитные объекты, оказывающие, как правило, сильное зашумляющее воздействие на магнитные сенсоры и первичные измерительные преобразователи, неприемлемо или малоэффективно.

Таким образом, пропуски, аномалии, высокая пространственная и временная анизотропия рассматриваемых в работе данных, их значительная информационная энтропия и сложный гармонический состав являются дополнительными факторами неопределенности, вследствие которых большинство известных прогностических моделей и методов пространственной интерполяции оказываются малоэффективными.

СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

В ряде работ российских и зарубежных ученых приводятся результаты исследований, касающихся систем сбора, обработки, передачи, хранения, прогнозирования и интерпретации геофизической информации (А. С. Амиантов, Ю. В. Афанасьев, Г. Р. Воробьева, А. Д. Гвишиани, В. Х. Кириаков, В. И. Одинцов, В. Г. Петров, В. А. Пилипенко, Я. А. Сахаров, В. Н. Селиванов, А. А. Соловьев, В. А. Троицкая, М. J. Engebretson, J. W. Gjerloev, M. Manda, S. Matsushita, J. Rasson, С. Т. Russel, A. Thomson и др.), а также подходы к построению интеллектуальных систем поддержки принятия решений на их основе, в том числе в условиях низкой ситуационной осведомленности (В. Е. Гвоздев, В. В. Миронов, Р. А. Мунасыпов, С. В. Павлов, Христуло О. И., Черняховская Л.Р., Юсупова Н. И. Каршаков Е.В., А. Б. Петровский, О. И. Ларичев, Ч. А. Найданов, В. М. Ефимов, Ю. К. Галактионов, Н. Ф. Шушпанова, M. Ghil, R. M. Allen, D. A. Dickey, W. A. Fuller и др.) [4, 5]. Однако, несмотря на значительный вклад в теорию и практику обработки различного рода пространственной информации, многие вызовы, сопряженные с современными тенденциями развития общества, остаются нерешенными и требуют дополнительных исследований [3].

Таким образом, проблема модернизации методологических основ обработки пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений в условиях низкой ситуационной осведомленности при эксплуатации технических систем высокоширотной инфраструктуры является актуальной научно-технической проблемой с острым прикладным характером.

Целью работы является разработка методологических основ обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений для повышения их эффективности в условиях низкой ситуационной осведомленности на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнитных данных).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести идентификацию и анализ проблемы обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений (на примере высокоширотных геомагнитных данных), а также предложить адаптированный комплекс параметров для оценки показателей надежности источников такого рода информации.

2. Разработать и формализовать в теоретико-множественном базисе концепцию обработки распределенной пространственной информации в условиях низкой ситуационной осведомленности (на примере геомагнитных данных) в системах поддержки принятия решений на основе технологии агрегированных цифровых двойников сложных технических объектов, а также предложить подход к кластеризации ее источников.

3. Разработать комплекс математических моделей, методов и алгоритмов, которые в соответствии с предложенной концепцией реализуют обработку, анализ и ретроспективный прогноз распределенной пространственной информации, получаемой с выхода разнородных цифровых и физических двойников.

4. Разработать комплекс функциональных подсистем обработки и динамической мультимасштабной визуализации распределенной пространственной информации, получаемой с выхода агрегированных цифровых двойников и их физических прототипов (на примере спутниковых данных, магнитных обсерваторий и вариационных станций).

5. Разработать экспериментальный прототип проблемно-ориентированной отраслевой системы поддержки принятия решений, функционально связанный с системой агрегированных цифровых двойников, обеспечивающий повышение эффективности поддержки принятия решений при эксплуатации сложных пространственно-распределенных технических систем высокоширотной инфраструктуры.

6. Выполнить анализ эффективности предложенных концепции, моделей, методов и алгоритмов, в совокупности представляющих методологические основы обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений в условиях низкой ситуационной осведомленности.

Таким образом, объект данного исследования – масштабируемая пространственно-распределенная информационная система цифровых двойников-экземпляров, а также агрегированных цифровых двойников, функционально связанная с проблемно-ориентированной системой поддержки принятия решений при эксплуатации высокоширотных технических систем в условиях низкой ситуационной осведомленности. Предмет исследования – методологические основы обработки, анализа, реконструирования и трансформации распределенной пространственной информации, используемой в процессах поддержки принятия решений при эксплуатации технических систем высокоширотной инфраструктуры в условиях низкой ситуационной осведомленности.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОБРАБОТКИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Обсудим проблемы на примере высокоширотных геомагнитных данных. Проводятся идентификация и анализ проблемы обработки распределенной пространственной информации в системах поддержки принятия решений, обозначаются пути ее решения и разрабатывается комплекс показателей для оценки их эффективности и надежности.

Так, например, расценивая появление пропущенного значения во временных рядах геомагнитных данных как функциональный отказ технической системы (магнитной станции), то есть ее переход в неработоспособное состояние, приводится оценка показателей надежности магнитных станций как объектов-источников данных: общее время неработоспособного состояния станции, соответствующее числу пропущенных значений во временном ряду (1); среднее время до восстановления рабочего состояния (эквивалент математического ожидания размера отсутствующего фрагмента) и среднее время наработки до отказа системы (эквивалент среднего размера фрагмента без пропусков) – выражение (2) и (3) соответственно [6].

$$T_F = T - T_W, \quad (1)$$

где T – наработка, T_W – число информативных значений (общее время работоспособного состояния) за период времени T .

Среднее время до восстановления рабочего состояния (эквивалент математического ожидания размера отсутствующего фрагмента) и среднюю наработку между отказами системы (эквивалент среднего размера фрагмента без пропусков) можно определить из выражений (2) и (3) соответственно.

$$\langle T2R \rangle = \frac{1}{N_F} \sum_{i=1}^{N_F} T2R_i = \frac{T_F}{N_F}; \quad (2)$$

$$\langle T2F \rangle = \frac{1}{N_W+k} \sum_{i=1}^{N_W+k} T2F_i = \frac{T_W}{N_W+k}, \quad (3)$$

где $T2R_i$ и $T2F_i$ – время до i -го восстановления системы после отказа и до i -го отказа системы соответственно, N_F и N_W – число отказов системы и число восстановлений после отказа соответственно, $k = 1$ или $k = 0$, если в момент начала наблюдения система находилась в работоспособном или неработоспособном состоянии соответственно [7, 8].

Общее время безотказной работы сети (TW^{\sim}), то есть время, в течение которого все станции сети находились в работоспособном состоянии (эквивалент мощности множества, являющегося результатом пересечения множеств информативных данных по всем станциям сети), определится следующим образом:

$$TW^{\sim} = |\cap_N K|, \text{ где } K = \{k_j\}_{j=1}^{T-TF} : S_{k_j} \neq \emptyset, k_j \in [1, T]; S = \{s\}_{i=1}^T. \quad (4)$$

На примере высокоширотных магнитных станций сети IMAGE было показано, что в 50 % случаев математическое ожидание размера пропущенного фрагмента превышает ~58,5 мин. Усредненный (по всем IMAGE-станциям) размер пропущенного фрагмента составляет ~1066 мин. Математическое ожидание числа отказов с восстановлением превышает 45 в год. При этом 50 % IMAGE-станций испытывают за год более 17 отказов, а вероятность безотказной работы всех магнитометров не превышает 0,47. В крайних случаях объем отсутствующих фрагментов одной станции может превышать 11,2 % от наработки, при этом среднее время восстановления достигает 10 суток и более [9, 10].

Аналогичные исследования для магнитных обсерваторий глобальной сети INTERMAGNET (IMO), поддерживающей наивысший стандарт качества, также выявили наличие значительного количества пропущенных фрагментов, занимающих достаточно широкий диапазон и варьирующихся как во времени, так и от станции к станции. Так, например, для станции Alma Ata (AAA) в 2015 г число пропущенных значений составило 36 % от годовой наработки, для станции Dalat (DLT) – более 12 %, для станции Sodankyla (SOD) – 0,4 % и т. д.

Пространственный анализ времени безотказной работы магнитных станций показал, что наиболее эффективные обсерватории находятся, как правило, на территории Центральной Европы, Скандинавии, Великобритании и Японии, а станции с низкими показателями надежности, как правило, в странах Южной Америки, Ближнего Востока и Юго-Восточной Азии [11].

Наблюдаемая ситуация сопряжена с рядом затруднений относительно возможности применения к такого рода пространственной информации математического аппарата, требующего соблюдения условия непрерывности временного ряда. Отсутствующие значения также создают ощутимые проблемы как при моделировании геопространственного распределения вариаций ГМП, так и при обработке связанной с ними экспериментальной информации высокого уровня (индексы геомагнитной активности, карты возмущенности ГМП, магнитные кеограммы и пр.), а также негативным образом сказываются на качестве и эффективности управленческих решений, принимаемых на их основе [12].

В значительной степени решить данную проблему представляется возможным путем комплексного применения методов геоинформатики, машинного обучения и цифровых двойников (рисунок 1).

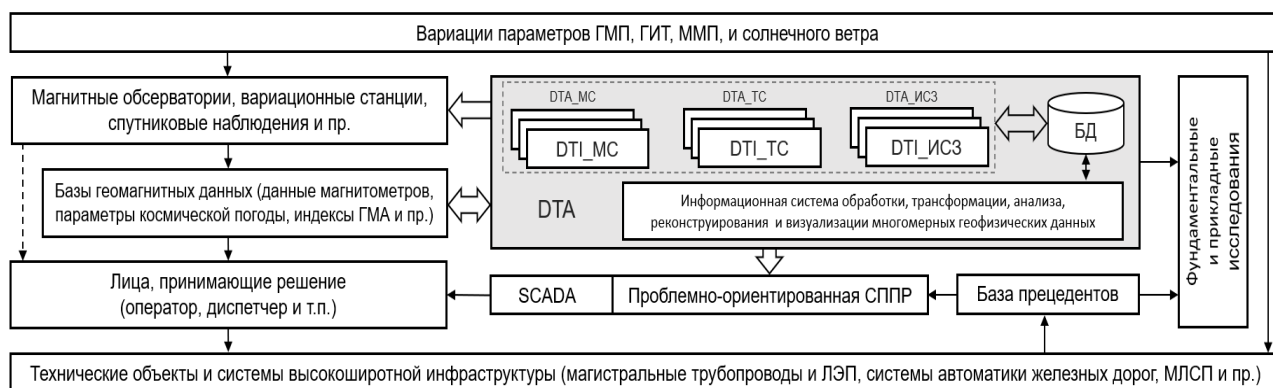


Рис. 1 Подход к модернизации процессов, технических и информационных систем сбора, аналитической обработки, трансформации и визуализации пространственной информации (на примере геомагнитных данных).

При этом в работе под цифровым двойником понимается динамическое виртуальное представление физического объекта, технической системы или технологического процесса на базе исторических данных и данных, получаемых в режиме реального времени с целью повышения эффективности этого объекта процесса или системы [13–17].

КОНЦЕПЦИЯ ОБРАБОТКИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СИТУАЦИОННОЙ ОСВЕДОМЛЕННОСТИ

Рассмотрим разработанную и формализованную в теоретико-множественном базисе концепцию обработки распределенной пространственной информации в условиях низкой ситуационной осведомленности (на примере геомагнитных данных) в системах поддержки принятия решений на основе технологии агрегированных цифровых двойников сложных технически объектов.

Так, предполагается, что существует N базовых наземных пространственных кластеров, представляющих собой универсальное множество GEO^0 :

$$\{GEO_1^0, \dots, GEO_N^0\} \in GEO^0 \mid \exists m, n \mid (GEO_m^0 \cap GEO_n^0) \supseteq GEO_m^0, \quad (5)$$

где m и $n \in \mathbb{N}$. При этом не исключается, что $\exists m, n \mid GEO_m \cap GEO_n \neq \emptyset$.

Каждый кластер может включать в себя ряд гетерогенных функционально связанных источников информации, например:

$$GEO_i^0 = \{M_i^1, \dots, M_i^{k_i}\} \cup \{C_i^1, \dots, C_i^{u_i}\}, \quad i \in \mathbb{N}, \quad (6)$$

где $\{M_i^1, \dots, M_i^{k_i}\} = M_i$ и $\{C_i^1, \dots, C_i^{u_i}\} = C_i$ – множества наземных источников данных по ГМП и ГИТ соответственно, принадлежащих i -му наземному базовому кластеру GEO_i^0 .

Принимая во внимание внутреннюю структуру элементов множеств M_i и C_i (рисунок 2), запишем [18]:

$$M_i^j = \{Q1_i^j, \dots, Q7_i^j\} = \{\{TM1_i^j, PM1_i^j\} \in Q1_i^j, \dots, \{TM7_i^j, PM7_i^j\} \in Q7_i^j\}, \quad (7)$$

где $\{TM1_i^j, PM1_i^j\}$ – кортеж множеств, отражающий состояние параметра $Q1$ с точки зрения ДТИ j -й магнитной станции/обсерватории (ТМ), входящей в i -й пространственный кластер и с точки зрения его ФП (РМ) соответственно; для $Q2, \dots, Q7$ и $\{TM2_i^j, PM2_i^j\}, \{TM2_i^j, PM2_i^j\}, \dots, \{TM7_i^j, PM7_i^j\}$ – аналогично.

Тогда, условием отказа атомарной подсистемы, регистрирующей параметр $Q1$ в рамках наземной системы, синтезирующей множество M_i^j , является:

$$\left((TM1_i^j \not\subseteq Q1_i^j \not\subseteq M_i^j) = \emptyset \right) \wedge \left((PM1_i^j \not\subseteq Q1_i^j \not\subseteq M_i^j) = \emptyset \right). \quad (8)$$

Условия срабатывания подсистем, регистрирующих параметры $Q2_i^j, \dots, Q7_i^j$, определяются аналогично [19, 20].

Принимая во внимание, что

$$Q5^2 = Q1^2 + Q2^2 + Q3^2; \quad Q4^2 = Q1^2 + Q2^2; \quad Q6 = \arctg\left(\frac{Q2}{Q1}\right); \quad Q7 = \arcsin\left(\frac{Q3}{Q5}\right),$$

где $Q5$ и $Q4$ – полный вектор и горизонтальная составляющая ГМП соответственно, $Q6$ и $Q7$ – угловые элементы ГМП.

Здесь возможно расширить условие наличия непустых членов множества M :

$$\forall M \exists (Q1_i^j \not\subseteq M_i^j) \neq \emptyset \mid \left((Q2_i^j, Q3_i^j, Q5_i^j \not\subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q2_i^j, Q4_i^j \not\subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q2_i^j, Q6_i^j \not\subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right);$$

$$\forall M \exists (Q2_i^j \not\subseteq M_i^j) \neq \emptyset \mid \left((Q1_i^j, Q3_i^j, Q5_i^j \not\subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q1_i^j, Q4_i^j \not\subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q1_i^j, Q6_i^j \not\subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right);$$

$$\forall M \exists (Q3_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \left| \left((Q1_i^j, Q2_i^j, Q5_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q5_i^j, Q7_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q7_i^j, Q4_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \right|;$$

$$\forall M \exists (Q4_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \left| \left((Q1_i^j, Q2_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q3_i^j, Q7_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \right|;$$

$$\forall M \exists (Q5_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \left| \left((Q1_i^j, Q2_i^j, Q3_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q3_i^j, Q4_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q3_i^j, Q7_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \right|;$$

$$\forall M \exists (Q6_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \left| \left((Q2_i^j, Q1_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \right|;$$

$$\forall M \exists (Q7_i^j \subseteq M_i^j) \left| \left((Q3_i^j, Q5_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \vee \left((Q3_i^j, Q4_i^j \subseteq M_i^j) \neq \emptyset \right) \right|.$$

Таким образом, на примере DTI магнитных станций (7), функционально сопряженном с вычислительным модулем, показано, что предлагаемая концепция обеспечивает информационную избыточность, создает эффект резервирования и повышает отказоустойчивость технической системы.

Применение процедур трансформации к данным космического и наземного пространственного кластеров, а также конвертации между системами координат обеспечивает их унификацию, возможность хранения в рамках единого информационного пространства GenDB и их последующего использования для широкого спектра задач в области поддержки принятия решений [21].

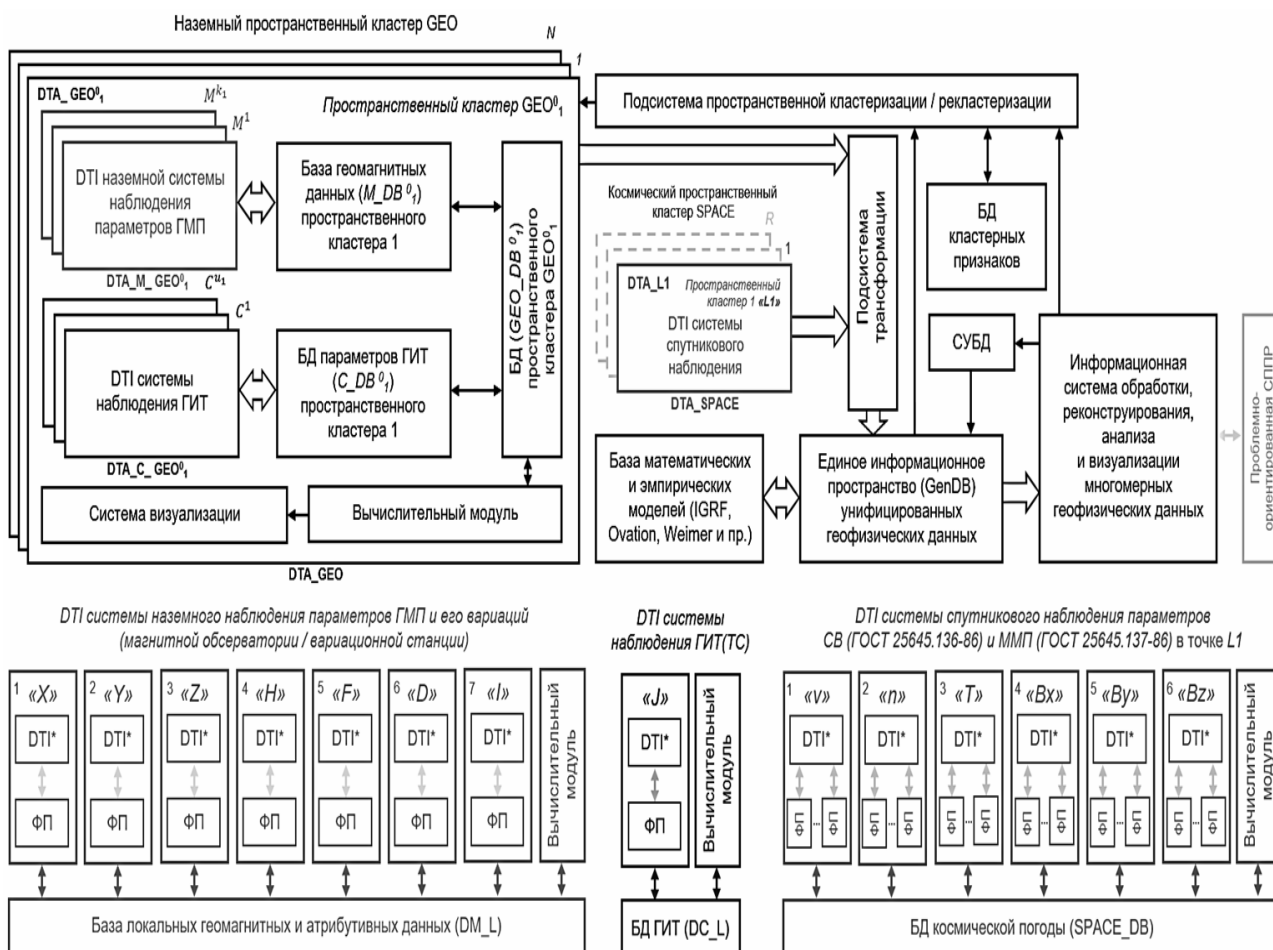


Рис. 2 Графическое представление концепции многоуровневой системы ЦД:
 DTI – цифровой двойник (ЦД)-экземпляр; DTI* – атомарный DTI; DTA – агрегированный ЦД;
 ФП – физический прототип; ГИТ – геоиндуцированные токи; ТС – трансформаторная станция;
 СВ – солнечный ветер; ММП – межпланетное магнитное поле.

Исследование и статистический анализ временных рядов геомагнитных данных, получаемых с выхода пространственно-распределенных магнитных станций, показали, что рассматриваемые в работе источники информации могут быть охарактеризованы семейством распределений, задаваемых выражением (9), демонстрирующем при $\beta < 2$ наличие тяжелых хвостов (высокоширотные и авроральные станции) и легкие хвосты при $\beta > 2$ (приэкваториальные станции для X -составляющей и среднеширотные станции для Y -составляющей); при $\beta = 2$ и $\beta = 1$ хвосты распределения соответствуют нормальному и лапласовскому (экспоненциальному) закону распределения соответственно.

$$\text{PDF}(x) = (\beta/\Gamma(1/\beta))\exp(-|x|^\beta), \quad (9)$$

где Γ – гамма-функция, β – коэффициент формы.

При $\beta < 1$ хвосты распределения тяжелее лапласовских и более соответствуют логнормальному закону [22, 23].

Для идентификации кластерной принадлежности рассматриваемых стационарных источников пространственной информации (на примере аврорального кластера $\text{GEO}_{\text{Aurora}} = \{M^1_{\text{Aurora}}, \dots, M^k_{\text{Aurora}}\}$) предлагается проверять выполнение следующего условия:

$$\int_{|\Delta X_{\min}|}^{|\Delta X_0|} \left(\frac{1}{s|\Delta X|\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\log^2|\Delta X|}{2s^2}\right) \right) d\Delta X + \int_{|\Delta X_0|}^{|\Delta X_{\max}|} (\lambda \cdot \exp(-\lambda|\Delta X|)) d\Delta X \approx 1, \quad (10)$$

где X_{\min} и X_{\max} – нижняя и верхняя диапозона возмущенной составляющей параметра X соответственно ($|\Delta X_{ij}| = |X_{ij} - \text{Me}(X_j)|$, X_{ij} – i -е значение за j -е сутки, $\text{Me}(X_j)$ – медианное значение выборки X за j -е сутки), X_0 – граница хвоста распределения ($X_0 \in [0,89-0,98]$), s и λ – параметры формы логнормального и экспоненциального распределений соответственно (рисунок 3).

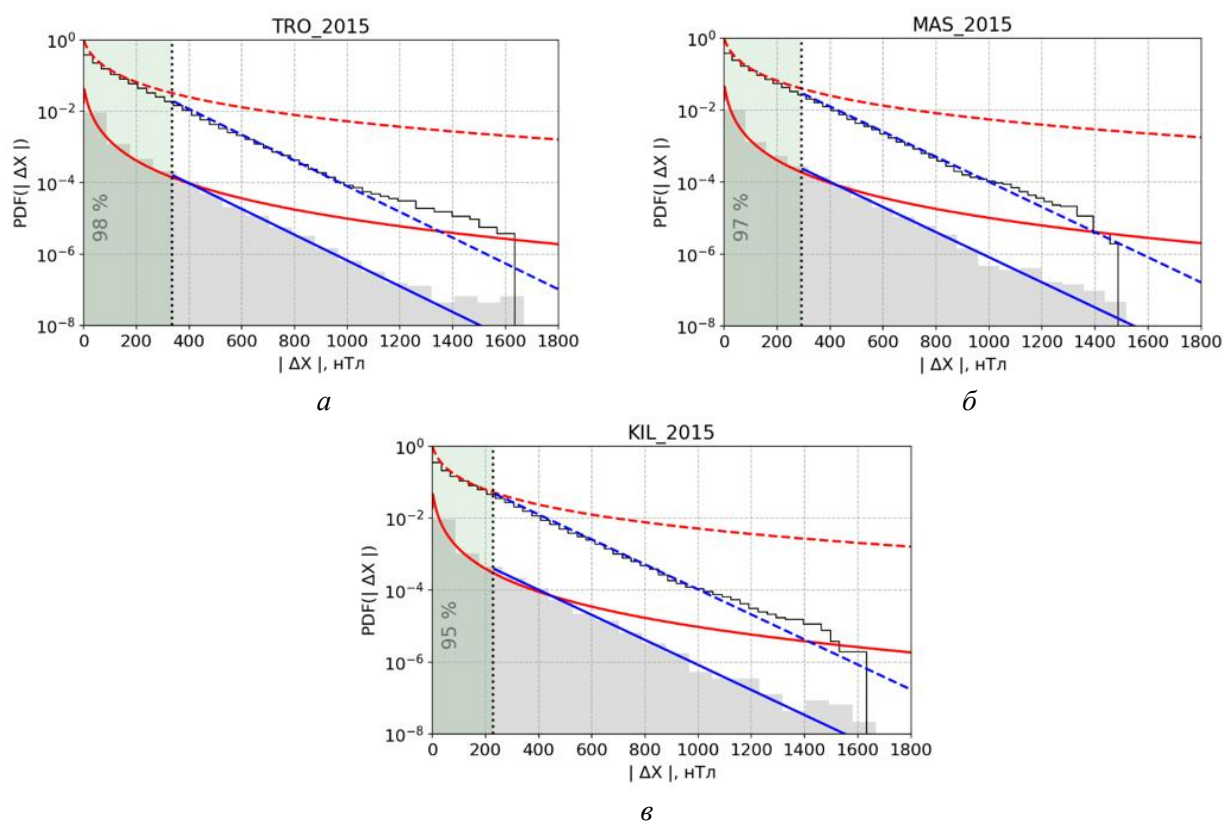


Рис. 3 Распределение плотности вероятностей значений возмущенной составляющей X -компоненты ГМП МВС аврорального кластера (красная и синяя сплошные линии соответствуют плотности вероятности логнормального и экспоненциального закона распределения соответственно; пунктирные – функциям выживаемости).

Рекластеризация наземных источников данных, сообразно решаемой задаче, осуществляется следующим образом [24]:

$$\{\exists (X \in \text{GEO}^{S-1}) \mid \bigcup_{i=1}^{w=|X|} \text{GEO}_{x_i \in X}^{S-1}\} = \text{GEO}_j^S; \quad \text{GEO}_j^S = \text{GEO}_m^{S-1} \cap \text{GEO}_n^S, \quad (11)$$

где S – максимальный уровень кластера, участвующего в рекластеризации.

КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ, АНАЛИЗА И РЕТРОСПЕКТИВНОГО ПРОГНОЗА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Обсудим, как путем ансамблирования методов машинного обучения (12), геостатистики (13) и статистического анализа разрабатывается комплекс математических моделей, методов и алгоритмов, способных в соответствии с предложенной концепцией реализовать обработку, анализ и ретроспективный прогноз пространственной информации, получаемой с выхода разнородных цифровых и физических двойников:

$$Q(x, \beta) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k = \sum_{j=1}^k \beta_j x_j = x^T \beta, \quad (12)$$

где Q – реконструируемый параметр, $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ – вектор регрессоров, $\hat{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)^T$ – вектор столбец коэффициентов, k – число признаков модели.

$$Q = \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_i^p} Q_i \right) / \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_i^p} \right), \quad (13)$$

где m – число окрестных геодезических пунктов, Q_i – значение реконструируемого параметра в i -м геодезическом пункте (например, магнитной вариационной станции), d – расстояние между станцией геодезическим пунктом, для которого выполняется реконструкция пространственной информации и i -м окрестным геодезическим пунктом, p – весовой коэффициент.

Машинная оптимизация регрессионной модели на примере магнитной станции Kilpisjärvi (KIL), реализованная на базе метода elastic-net (14), обеспечила сокращение числа регрессоров на 21,4 % [25].

$$\hat{\beta} = \underset{\beta}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^k (\alpha \beta_j^2 + (1 - \alpha) |\beta_j|) \right), \quad (14)$$

где $\lambda \sum_{j=1}^k (\alpha \beta_j^2 + (1 - \alpha) |\beta_j|)$ – штраф за сложность модели, y – ожидаемый отклик модели, $\lambda \geq 0$ – параметр регуляризации, α – коэффициент смещения по оси ОУ.

Статистический анализ и проверка на выполнение условия (10) для признаков, имеющих ненулевой коэффициент при условии среднеквадратической ошибки (MSE), не превышающей 30 нТл, на примере станции KIL [26] позволили сократить вектор регрессоров модели цифрового двойника станции до 3 составляющих:

$$X_{\text{KIL}}^* = \alpha + \beta_1 X_{\text{TRO}} + \beta_2 X_{\text{MAS}} + \beta_3 X_{\text{ABK}}, \quad (15)$$

где $\alpha = 248,71$ нТл, $\beta_1 = 0,291$, $\beta_2 = 0,29$, $\beta_3 = 0,44$, X_{KIL}^* – синтезированные данные северной составляющей ГМП станции KIL X_{TRO} , X_{MAS} , X_{ABK} – северные составляющие ГМП, регистрируемые на станциях Tromsø (TRO), Masi (MAS) и Abisko (ABK) соответственно (рисунок 3).

В таблице 1 и на рисунке 4 представлены результаты валидации виртуальных моделей, построенных на базе выражений (12)–(15).

Таким образом, MSE ЦД в зависимости от числа доступных источников информации составляет от 11,5 до 28,9 нТл², то есть 0,51–1,26 % от размаха значений годовой выборки. Метрики, приведенные в таблице 1, указывают на то, что исходные и сгенерированные X^* данные статистически неразличимы и принадлежат к одной и той же выборке [27, 28].

Таблица 1

Параметры валидации виртуальных моделей магнитной станции KIL

Параметр Модель	MSE, [нТл ²]	MSE, [%]	R^2	r	T-test Стьюдента		T_w , [мин]	T_F , [мин]	P_w , [%]
					стат. критерий	p -знач.			
Выр. (12) + МНК	11,5	0,51	0,946	0,99	~0	~1	406936	118664	77,42
Выр. (12) + (14)	12,0	0,54		0,99	~0	~1	453819	71781	86,34
Выр. (15)	28,9	1,25		0,99	~0	~1	523257	2343	99,55
Выр. (13), ($p=3$)	114,1	4,94		—	0,98	~0	~1	406936	118664

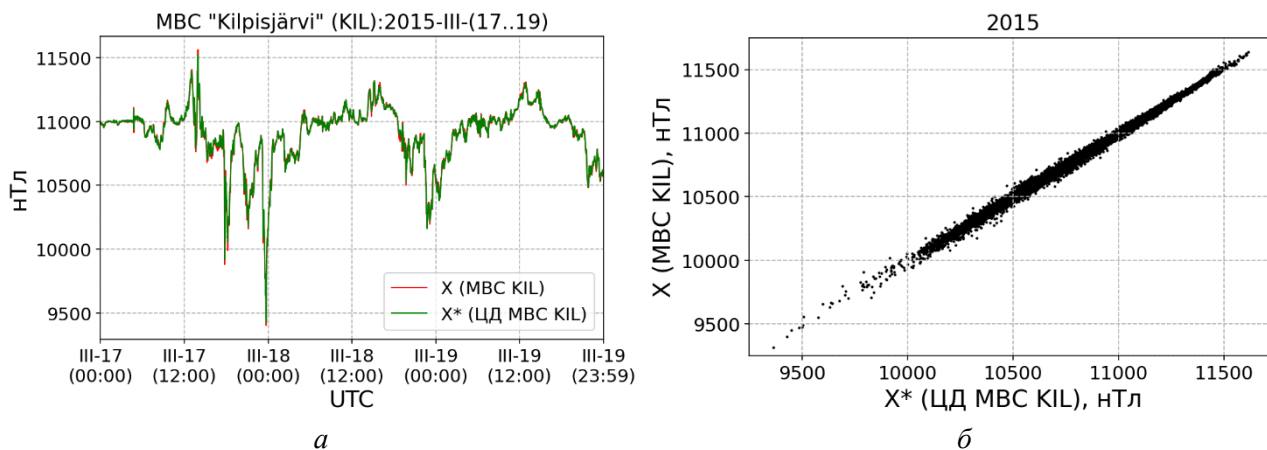


Рис. 4 Магнитограммы (а) и диаграмма рассеяния (б) результатов наблюдения посредством ЦД станции KIL и его физического прототипа.

Сравнительный анализ X и X^* в частотной области 2–7 мГц (диапазон P_{i3}/P_{s6} пульсаций, P_{c5} волн и начала суббурь) показал незначительные (в пределах метрик, обозначенных в таблице 1) отклонения амплитуды, при этом пространственная локализация частотных пакетов остается практически неизменной (рисунок 5) [29, 30].

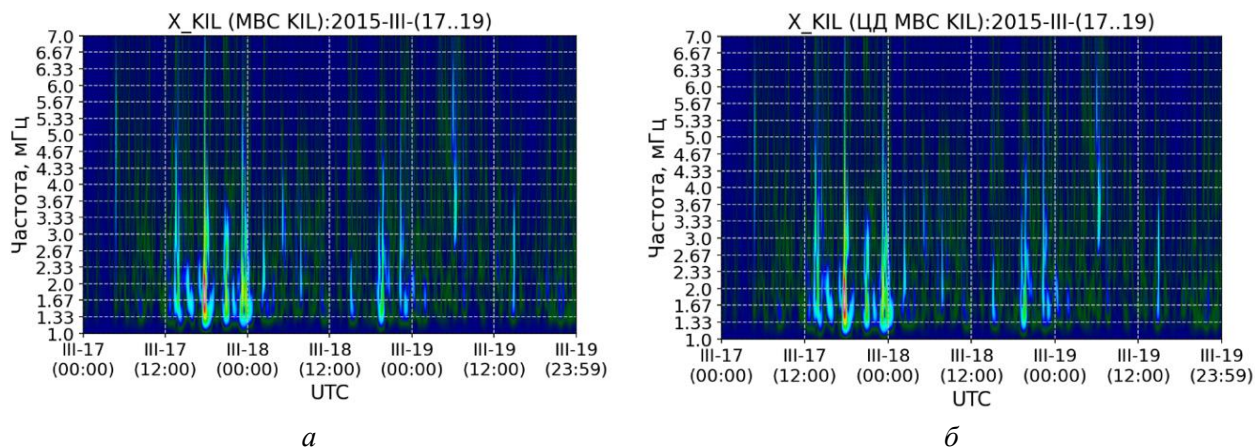


Рис. 5 Валидация ЦД в частотной области: вейвлет-скалограмма оригинального (а) и синтезируемого ЦД (б) временных рядов в частотной области 2–7 мГц.

На рисунках 6 и 7 приведены логическая модель (графическое представление логической структуры системы сбора и обработки информации) интеграции ЦД в процесс сбора и обработки геомагнитных данных и алгоритм сбора геомагнитных данных (на примере станции KIL) с использованием технологии ЦД соответственно.

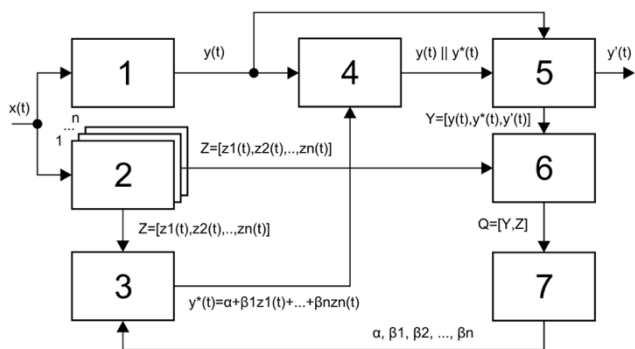


Рис. 6 Модель интеграции ДТИ в процессы сбора геомагнитных данных:
 1 – МС-прототип;
 2 – опорные источники данных (МС); 3 – математическое и алгоритмическое обеспечение ДТИ МС;
 4 – устройство сравнения;
 5 – выходной буфер;
 6 – база геомагнитных данных;
 7 – система корректировки весовых коэффициентов.

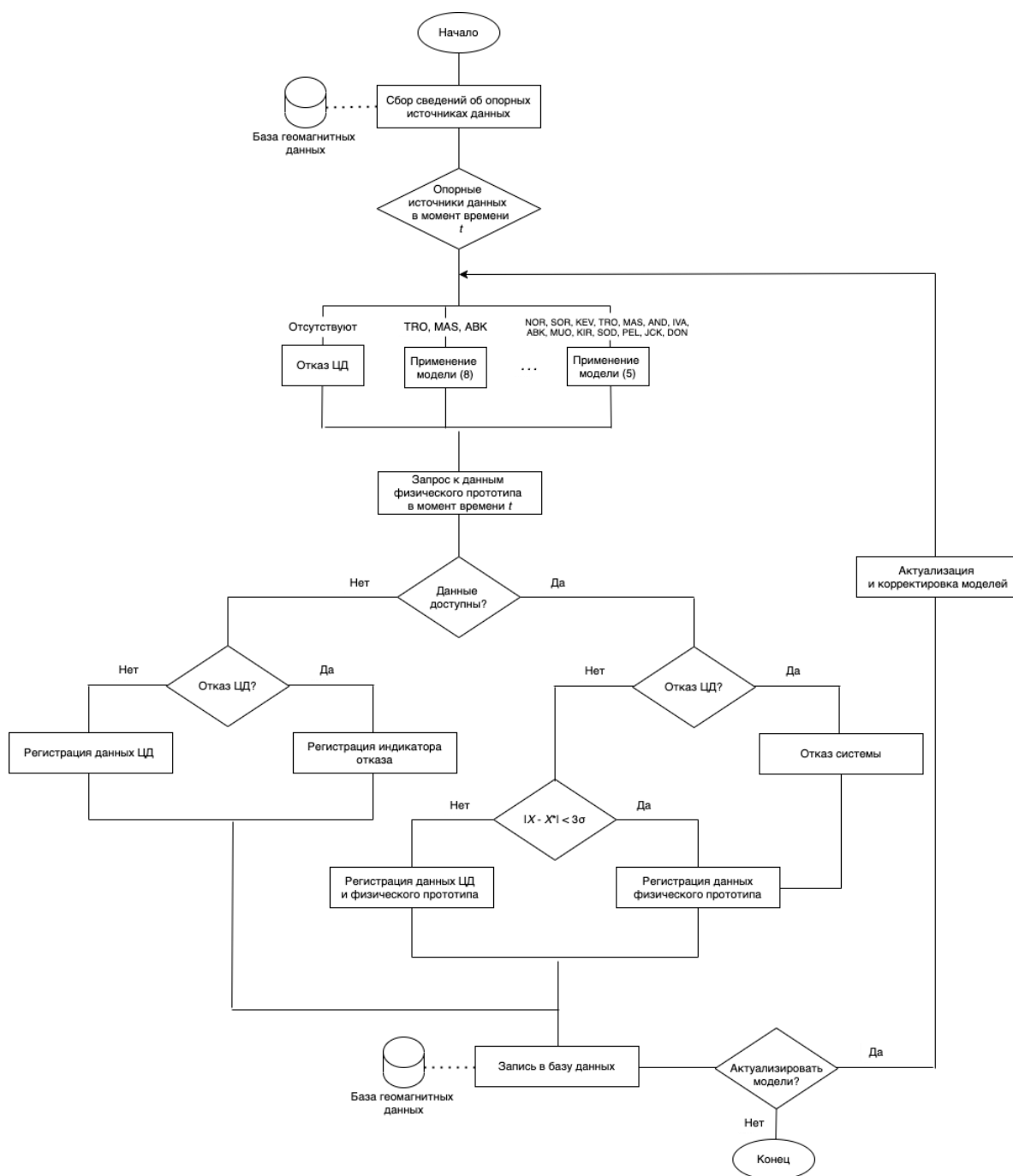


Рис. 7 Алгоритм процесса сбора геомагнитных данных с использованием ЦД экземпляра (на примере магнитной вариационной станции КИЛ).

Так, согласно рисунку 6, возмущающее воздействие $x(t)$ распространяется на физический прототип магнитной станции (блок 1) и ряд опорных источников данных (блок 2), информация с которых используется в моделях и алгоритмах ЦД (блок 3) и входит в состав его информационной среды. В зависимости от числа n доступных на момент времени t опорных источников, (на основании тестовых выборок) выбирается модель ЦД, реализующая синтез значения $y^*(t)$ с минимальной ошибкой относительно $y(t)$ – ожидаемого значения на выходе станции-прототипа (блок 1) [31, 32].

Далее данные, соответствующие состоянию ГМП в момент времени t , с выхода ЦД и ее физического прототипа поступают на устройство сравнения (блок 4), которое путем анализа этих значений, например, на основании выражения (16), принимает решение о публикации в качестве результата замера либо данных станции-прототипа (условие выполняется), либо ее ЦД-экземпляра (условие не выполняется). В случае невыполнения условия (16) значение с выхода магнитной станции-прототипа также сохраняется, однако помечается как аномальное. Если сигнал с выхода магнитной станции отсутствует, то в качестве результата замера публикуется соответствующее значение с выхода ЦД. Верифицированные значения, хранящиеся в базе геомагнитных данных (блок 6), структурируются в виде векторов ответов и регрессоров и используются для актуализации и корректировки векторов коэффициентов моделей ЦД (блок 7):

$$|x_i - x_i^*| < 3 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((x_i - x_i^*) - \bar{x})^2}, \quad (16)$$

где x_i^* и x_i – значения цифрового двойника и его физического прототипа соответственно в i -й момент времени t .

Таким образом, на примере ГМД станции КИЛ за 2015 г. было показано, что внедрение ЦД в процессы сбора и регистрации ГМД позволяет восстановить до 99,6 % данных, при этом для 86,7 % восстановленных значений $MSE \leq 12$ нТл² [33, 34].

КОМПЛЕКС ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОДСИСТЕМ ОБРАБОТКИ И ДИНАМИЧЕСКОЙ МУЛЬТИМАСШТАБНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Обсудим, основываясь на предложенном подходе к пространственной кластеризации опорных геодезических пунктов, разработку комплекса функциональных и обеспечивающих подсистем обработки (в частности, реконструирования) и динамической мультимасштабной визуализации пространственной информации, получаемой с выхода агрегированных цифровых двойников и их физических прототипов (на примере спутниковых данных, магнитных обсерваторий и вариационных станций).

В качестве основы разрабатываемой подсистемы предлагается использовать клиент-серверную архитектуру (рисунок 8). Серверная составляющая предложенной архитектуры объединяет уровни данных и бизнес-логики: первый из них отвечает за обращение к провайдерам пространственной информации, а второй – за предварительную обработку поступивших от них откликов. Клиентская составляющая, в свою очередь, интегрирует функции визуализации пространственных данных для конечного пользователя, обеспечивая таким образом соответствующую поддержку интерактивного взаимодействия с приложением посредством набора элементов пользовательского интерфейса.

Предложенная архитектура обеспечивает динамическую визуализацию пространственного распределения возмущенной составляющей ГМП как в виде изодинам (линий уровня), так и в виде векторного поля (рисунок 9) [35].

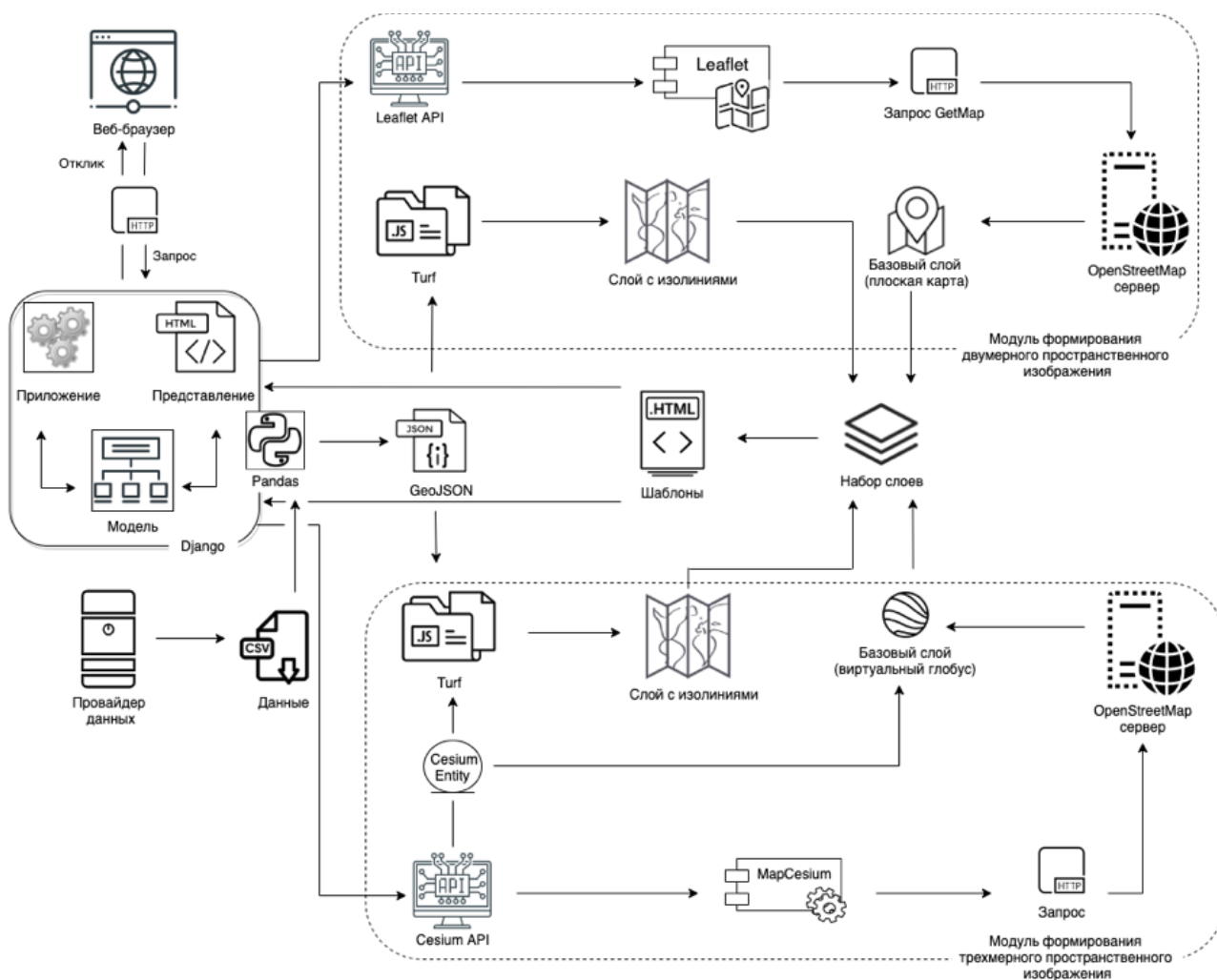


Рис. 8 Архитектура подсистемы динамической мультимасштабной визуализации.

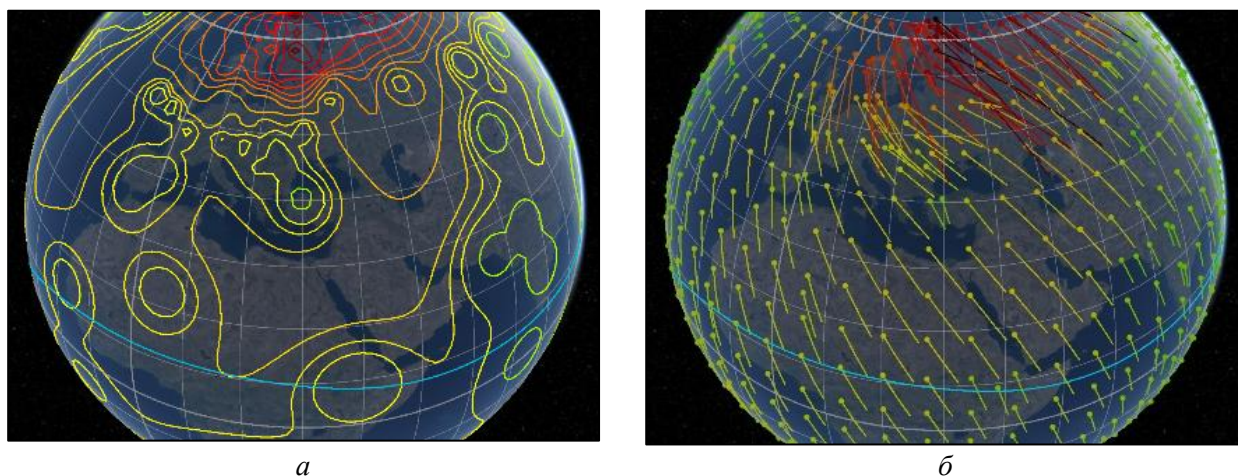


Рис. 9 Пример пространственного реконструирования и мультимасштабной визуализации характера распределения возмущенной составляющей полного вектора ГМП в виде изодинам (а) и горизонтальной составляющей (б) в виде векторного поля.

Выражения (17)–(22) определяют подход к трансформации пространственной информации, наблюдаемой в различных системах координат:

$$\text{MAG} = T \cdot \text{GEO}, \quad (17)$$

где MAG – система координат, ось Z которой совпадает с осью геомагнитного диполя, а ось Y направлена на пересечение географического экватора и географического меридиана, находящегося на 90° к востоку от меридиана, включающего ось геомагнитного диполя, GEO – географическая система координат, T – поворотная матрица, определяемая в соответствии с выражением:

$$T = \langle \beta, Y \rangle \cdot \langle \alpha, Z \rangle = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$r^2 = h^2 + 2h\sqrt{a^2\cos^2(\varphi) + b^2\sin^2(\varphi)} + \frac{a^4\cos^2(\varphi) + b^4\sin^2(\varphi)}{a^2\cos^2(\varphi) + b^2\sin^2(\varphi)}, \quad (20)$$

где h – высота над уровнем моря, φ – геодезическая широта, a и b – большая и малая полуоси земного эллипсоида вращения соответственно.

$$\begin{cases} \alpha = \lambda_{\text{dp}} = \arctan\left(\frac{h_1^1}{g_1^1}\right) - 90^\circ; \\ \beta = \varphi_{\text{dp}} - 90^\circ = \left(90^\circ - \arcsin\left(\frac{g_1^1\cos(\lambda_{\text{dp}}) + h_1^1\sin(\lambda_{\text{dp}})}{g_1^0}\right)\right) - 90^\circ, \end{cases} \quad (21)$$

где λ_{dp} и φ_{dp} – геодезические долгота и широта полюса геомагнитного диполя, g_1^1 , g_1^0 и h_1^1 – актуализированные сферические гармонические коэффициенты.

Таким образом, можно записать:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{MAG}} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{GEO}}. \quad (22)$$

Геодезическая форма записи координат определится следующим образом:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{MAG}} \Rightarrow \begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda \\ r \end{bmatrix}, \text{ где } \varphi = \arctan\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right); \lambda = \arctan\left(\frac{y}{x}\right); r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (23)$$

где φ , λ и r – координаты точки в системе координат MAG , записанные в геодезической форме.

Таким образом, принцип межкластерного сопряжения пространственной информации, получаемой от ЦД и их физических прототипов, является базой универсального информационного пространства, функциональное объединение которого с отраслевыми моделями посредством архитектуры, представленной на рисунке 10, обеспечивает возможность решения сложных научно-технических задач, например, таких как прогноз и анализ параметров аврорального овала и напряженности электрического поля в полярной шапке (рисунок 11) [36].

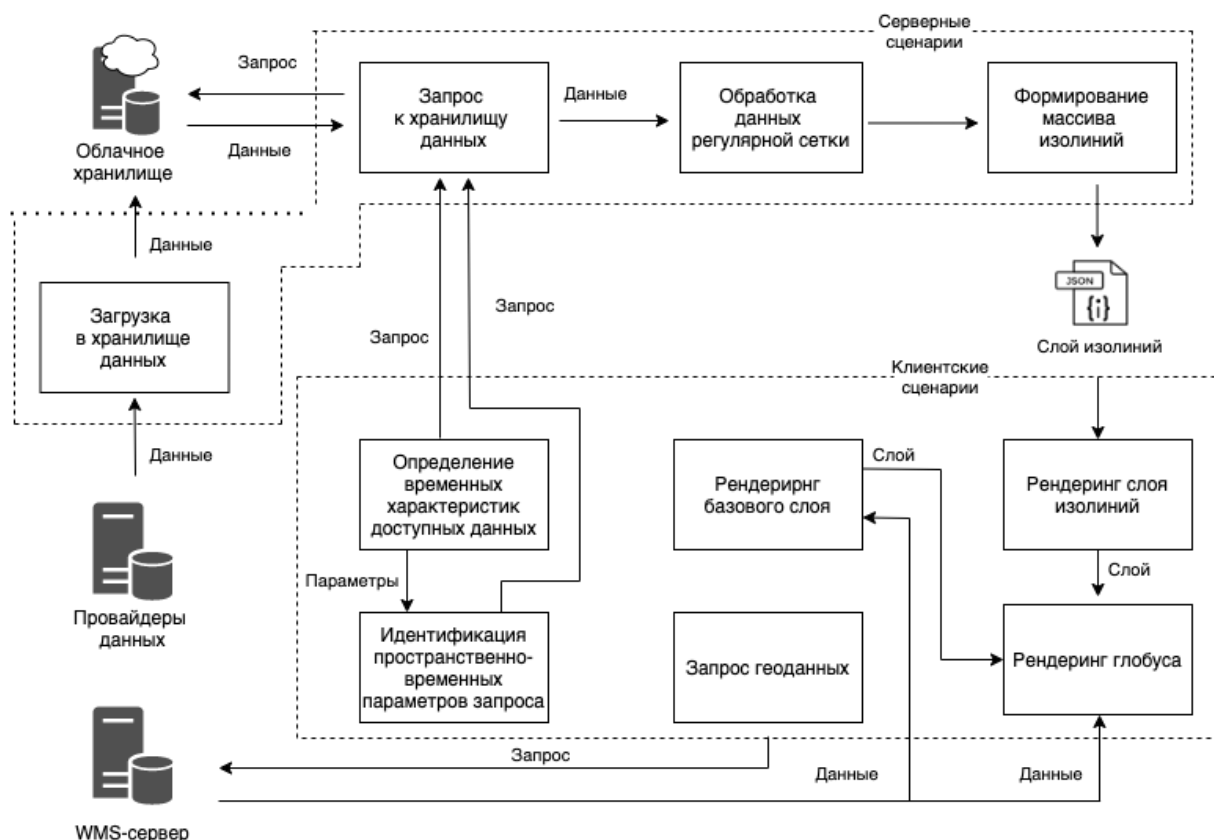


Рис. 10 Архитектура подсистемы краткосрочного прогноза, визуализации и экспресс-анализа геофизических параметров в авроральной зоне.

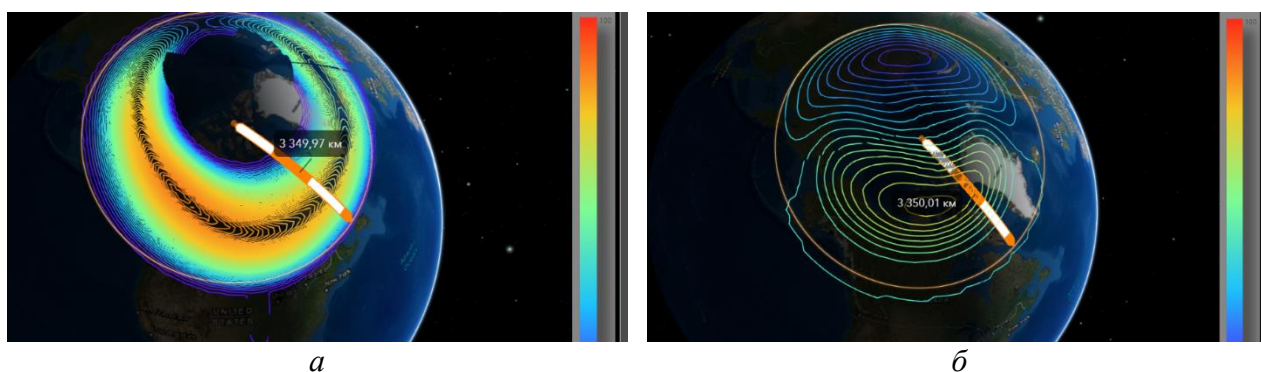


Рис. 11 Результат интерактивной мультимасштабной визуализации и реконструирования прогноза пространственного распределения параметров интенсивности полярного сияния, % (а) и напряженности электрического поля, кВ (б) по состоянию на 14 марта 2021 г. (06:21 UT)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРОТОТИП ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

На основе полученных теоретических результатов рассмотрим разработку и анализ экспериментального прототипа проблемно-ориентированной системы поддержки принятия решений, функционально связанного с системой агрегированных цифровых двойников, обеспечивающей повышение эффективности поддержки решений при эксплуатации технических систем высокоширотной инфраструктуры в условиях низкой ситуационной осведомленности.

Так, например, оценка коэффициента детерминации R^2 показала, что в рамках решаемой задачи подходы, основанные на методе множественной линейной регрессии и искусственной нейронной сети (ИНС) с функцией активации ReLu, являются наилучшими ($R^2 = 0,816$

и $R^2 = 0,814$ соответственно). Таким образом, например, на базе регрессионной модели уровень ГИТ в северной части Кольского полуострова в районе железнодорожной станции «Выходной» (VKH) можно оценить, согласно выражению (23). MSE при этом не превышает $0,12 \text{ A}^2$ ($\text{RMSE} \approx 0,35 \text{ A}$).

$$J_{\text{VKH}}^* = \alpha + \beta_1 \frac{\partial X_{\text{IVA}}}{\partial t} + \beta_2 \frac{\partial Y_{\text{IVA}}}{\partial t} + \beta_3 \frac{\partial X_{\text{SOD}}}{\partial t} + \beta_4 \frac{\partial Y_{\text{SOD}}}{\partial t} + \beta_5 \frac{\partial Y_{\text{ABK}}}{\partial t} + \beta_6 \text{GIC}_{X_{\text{IVA}}} + \beta_7 \text{IE}, \quad (23)$$

где $\alpha = 497,4 \times 10^{-4} \text{ A}$, $\beta_1 = 373,54 \times 10^{-4}$, $\beta_2 = 601,9 \times 10^{-4}$, $\beta_3 = 182,66 \times 10^{-4}$, $\beta_4 = 62,8 \times 10^{-4}$, $\beta_5 = -34,27 \times 10^{-4}$, $\beta_6 = 155,37 \times 10^{-4}$, $\beta_7 = 8,1 \times 10^{-4}$, X_{IVA} и Y_{IVA} – северная и восточная составляющие вектора ГМВ, регистрируемые системой ЦД-ФП станции «Ivalo» (IVA) соответственно; X_{SOD} и Y_{SOD} – северная и восточная составляющие вектора ГМП, регистрируемые системой ЦД-ФП станции «Sodankylä» (SOD) соответственно; Y_{ABK} – восточная составляющая вектора ГМП, регистрируемая системой ЦД-ФП станции «Abisko» (ABK), $\text{GIC}_{X_{\text{IVA}}}$ определяется в соответствии с выражением (24), IE – региональный индекс геомагнитной активности, характеризующий интенсивность аврорального электроджета [37].

$$\text{GIC}_X(t) = \left| \text{FT} \left\{ Y(f) \left(\sqrt{f/f_N} \cdot e^{i\frac{\pi}{4}} \right) \right\}^{-1} \right|, \quad (24)$$

где $\text{FT}\{\}^{-1}$ – обратное преобразование Фурье, f_N – частота Найквиста, Y – восточная составляющая вектора ГМП.

На рисунке 12 в качестве примера показан результат работы прототипа пассивной СППР ($r_{JJ}^* > 0,9$). Анализ суточного хода параметра $\text{Me}|J|_{\text{VKH}}$ выявил два максимума (околополуденный и полуночный) и два минимума (утренний и вечерний), периодичность которых со значимостью меньше 0,95 подтверждается при построении и анализе функций автокорреляции (АКФ) и частичной автокорреляции (ЧАКВ) [38], рисунок 13, в.

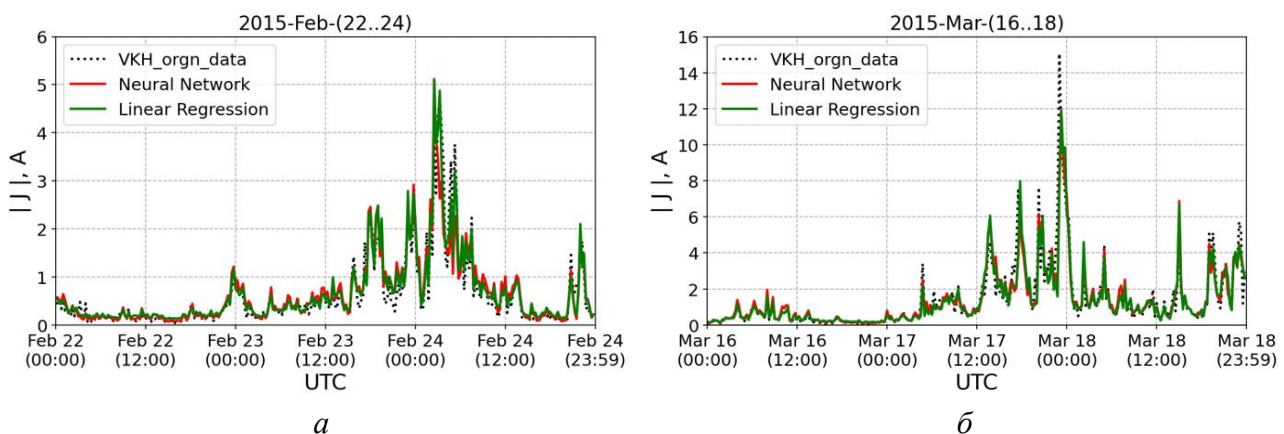


Рис. 12 Результат диагностики ГИТ на станции «Vykhodnoy» (VKH) посредством модели (23) для магнитных бурь 24.02.2015 г. ($K_p = 5$) и 17.03.2015 г. ($K_p = 8$).

Также установлено, что сезонное распределение значений $\text{Me}|J|$ (рисунок 13) отражает эффект Рассела–Макферона, что указывает на связь ГИТ с ориентацией ГМП относительно магнитного поля СВ, и повышает эффективность поддержки принятия решений за счет анализа соответствующей спутниковой информации.

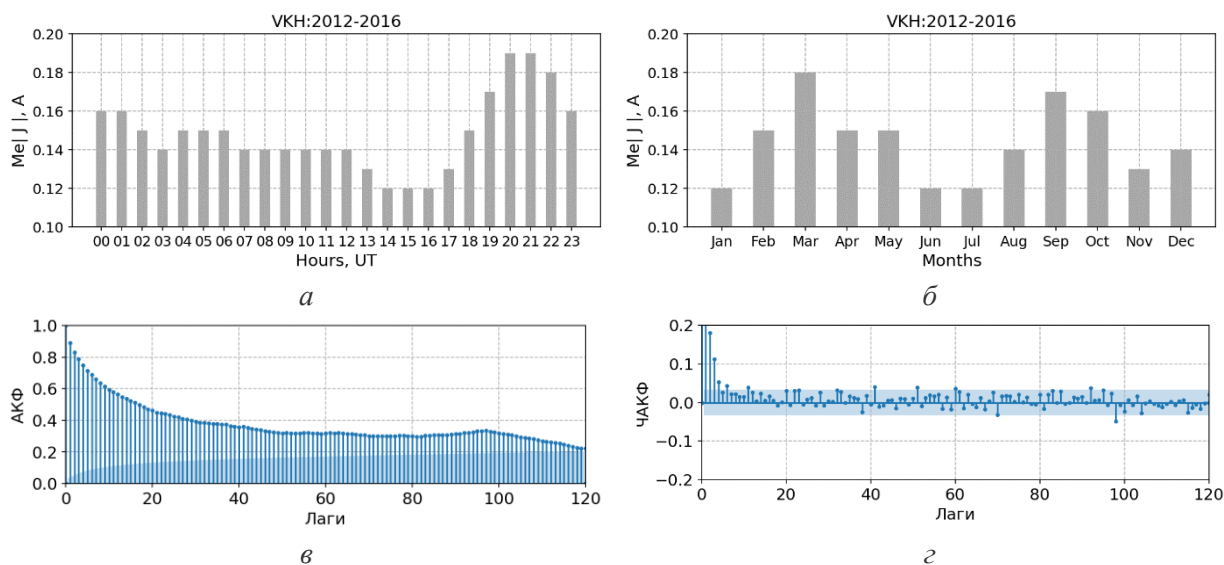


Рис. 13 Суточный (а) и сезонный (б) ход медианного значения ГИТ по данным минутных наблюдений на трансформаторной подстанции «Vykhodnoy» (VKH) за период с 2012 по 2016 год (в и з — АКФ и ЧАКФ параметра $|J_{VKH}|$ соответственно).

Сопряжение полученных результатов с подсистемой визуализации пространственного распределения геомагнитных возмущений позволило выделить географические границы регионов и принадлежащие им пространственно-распределенные технические системы, наиболее уязвимые в периоды ГМА (рисунок 14) [39, 40].

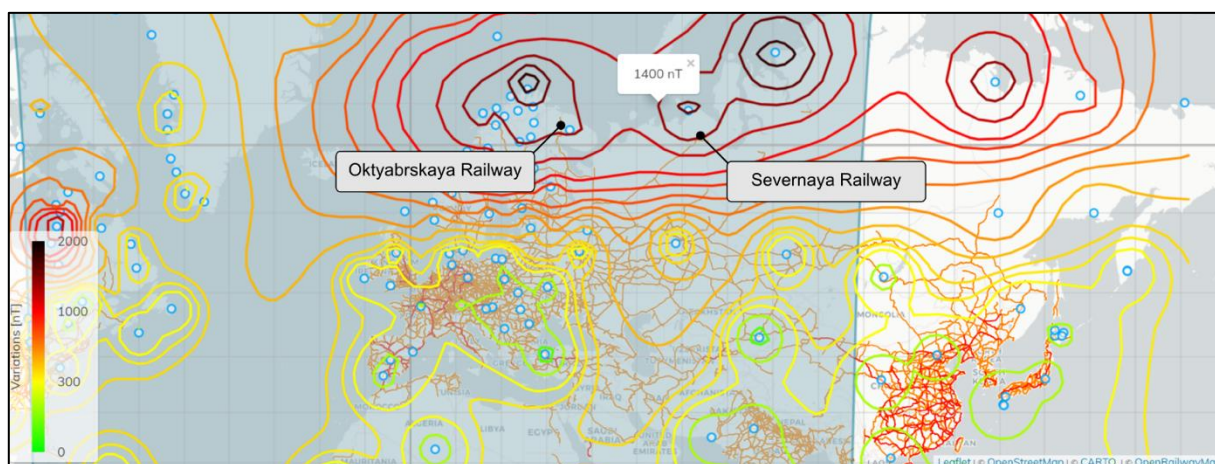


Рис. 14 Результат оценки географических границ возникновения экстремальных ГИТ в АЗРФ по результатам работы системы агрегированных цифровых двойников.

Так, например, согласно данным, полученным в результате работы предложенной СППР, северные ветки Октябрьской (Санкт-Петербург–Мурманск) и Северной (Ярославль–Воркута) железных дорог подвергаются воздействию экстремальных ГИТ в периоды сильной ГМА, что соотносится со статистикой зарегистрированных сбоев сигнальной автоматики на обозначенных участках железнодорожной инфраструктуры (рисунок 14).

Принимая во внимание тесную связь динамики Pc3-5 волн (диапазон частот 1–7 мГц) в магнитосфере Земли с ускорением электронов до релятивистских энергий во время магнитных бурь, что в свою очередь может приводить к частичному или полному отказу спутниковых систем в рамках разрабатываемой СППР целесообразно предусмотреть программный модуль идентификации и автоматизированного анализа частотных пакетов в заданном диапазоне (рисунок 15) [41].

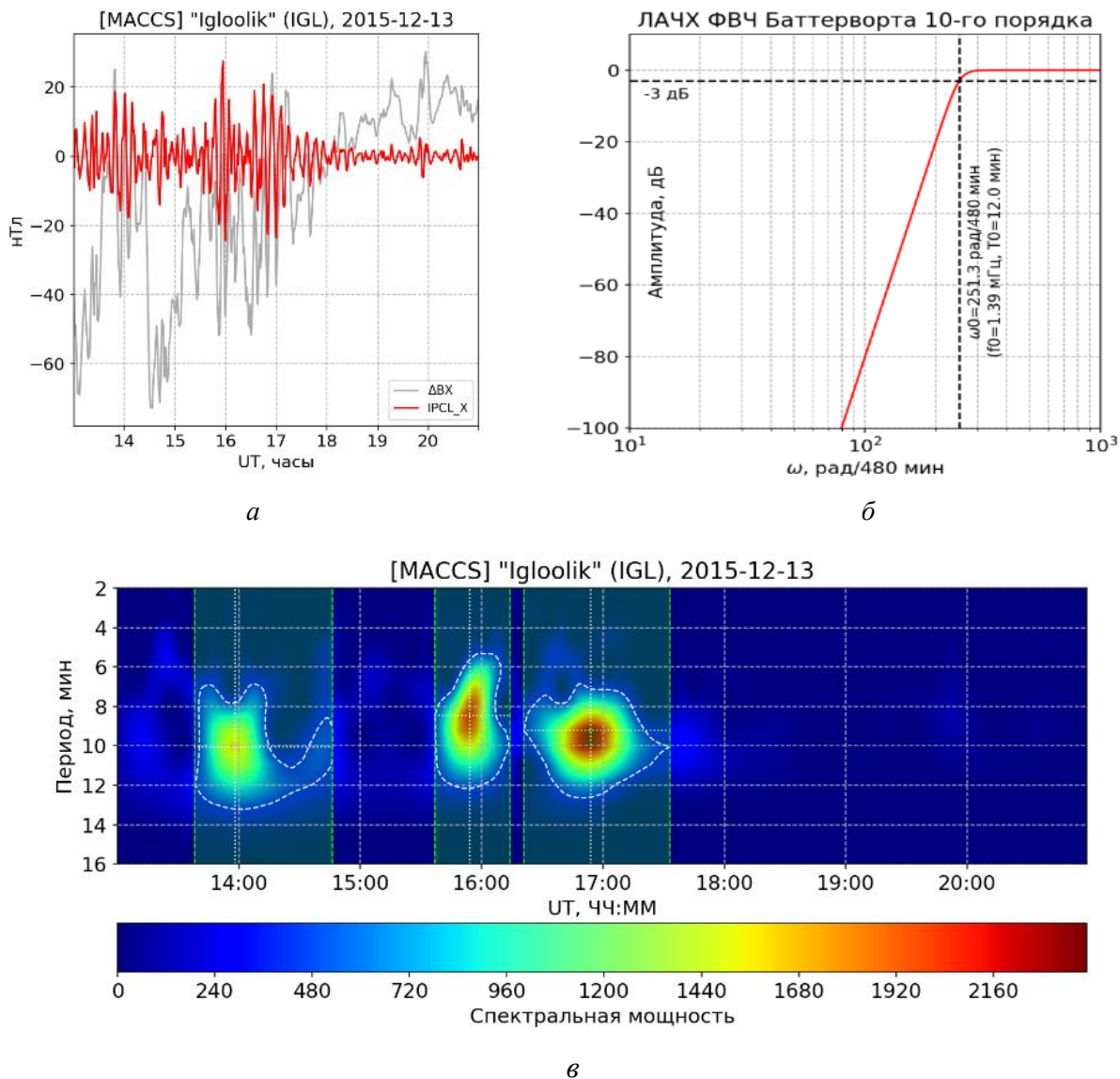


Рис. 15 Пример идентификации геомагнитных пульсаций:

а – серая и красная линии соответствуют исходной геофизической информации, получаемой от системы ЦД-ФП магнитной станции и отфильтрованному ФВЧ (*б*) временному ряду соответственно; *в* – результат идентификации Pc5-частотных пакетов.

Идентификацию информации о параметрах волновых пакетов предлагается осуществлять путем выделения геометрического подмножества точек, соответствующего границе волнового пакета на вейвлет-скалограмме, согласно выражению:

$$\left\{ sp^* | sp_{mn}^* \geq \sqrt{\frac{1}{M+N-1} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (sp_{mn} - \overline{sp})^2} \right\} \forall, sp^* \in sp; n, m \in \mathbb{N}, \quad (25)$$

где sp^* – геометрическое множество точек, составляющих границу частотного пакета в частотно-временной области (область вейвлет-скалограммы), M и N – параметр горизонтальной и вертикальной развертки изображения вейвлет-скалограммы соответственно, \overline{sp} – среднее значение sp .

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВНЕДРЕНИЯ РАБОТЫ

Обсудим практическое использование результатов работы в организациях, предприятиях и учреждениях, представляющих различные отрасли народного хозяйства (наука, промышленность, образование).

Так, например, значимая часть полученных результатов используется в Геофизическом центре РАН в рамках выполнения проекта «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта».

Кроме этого, СППР для прогноза, визуализации и экспресс-анализа параметров в авроральной зоне «Aurora-Forecast» (<http://aurora-forecast.ru/>) используется в гелиогеофизическом центре ФГБУ Института прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова в цикле работ, направленных на создание адаптируемых моделей авроральных овалов и каспов Земли по данным наземных и космических средств мониторинга солнечной активности и околоземного пространства с информационной независимостью от зарубежных источников информации и совместимостью с программным обеспечением технологии «Сюжет-МВ».

Система, обеспечивающая поддержку принятия решений при оценке рисков, во время трансэкваториальных и кросс-арктических авиаперелетов (рисунок 16), основанная на IGRF модели (26), внедрена и используется на кафедре Безопасности полетов и жизнедеятельности ФГБОУ ВПО Московский государственный технический университет гражданской авиации в курсах учебных дисциплин «Экология» и «Промышленная экология».

$$U = R_3 \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)) \left(\frac{R_3}{r}\right)^{n+1} P_n^m \cos\theta, \quad (26)$$

где r – геоцентрическое расстояние, λ – долгота от Гринвичского меридиана, град., $\theta = (\pi/2) - \varphi'$, град., где φ' – широта в сферических координатах, град., R_3 – средний радиус Земли, $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$ – сферические гармонические коэффициенты, зависящие от времени, P_n^m – нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра степени n , порядка m .

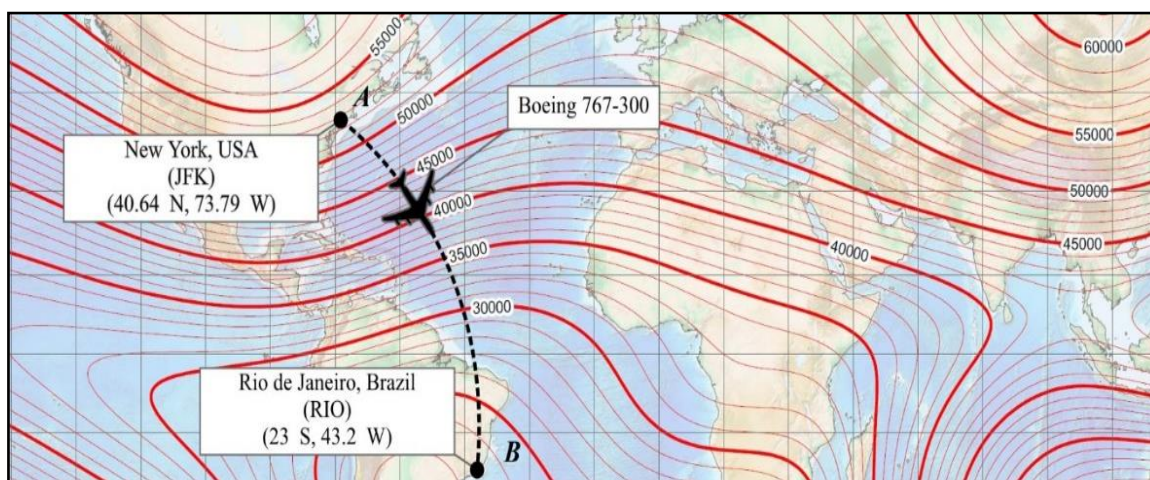


Рис. 16 Пример работы СППР для оценки воздействия вариаций ГМП на бортовые системы летательного аппарата в процессе его движения в анизотропном ГМП.

Программный комплекс «Geomagnetic» [42], обеспечивающий в соответствии с выражениями (27)–(28) оценку дополнительной погрешности магнитных инклинометров, возникающей в периоды сильной магнитной активности (рисунок 17) в процессах их калибровки, поверки и эксплуатации, успешно внедрен и используется в ОАО «Башнефтегеофизика» и ОАО НПФ Геофизика.

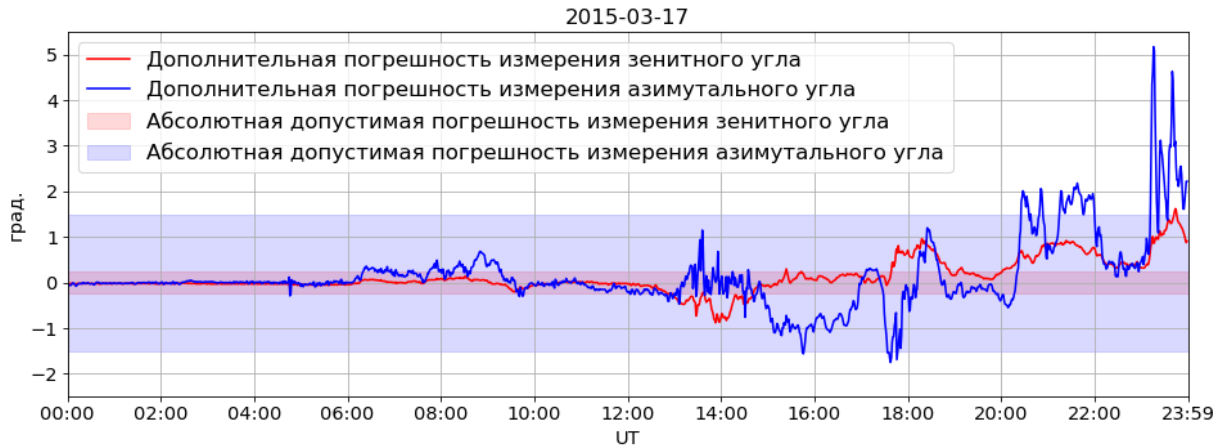


Рис. 17 Результат оценки уровня превышения допустимой погрешности при регистрации зенитного и азимутального углов во время магнитной бури 17 марта 2015 г.

$$0,2 X_{\text{осн}} + \left(\frac{|20-T|}{100}\right) X_{\text{осн}} + X_M \leq 0,35 X_{\text{осн}}; \quad (27)$$

$$k_U X_{\text{осн}} + k_T X_{\text{осн}} + X_M \leq k_F X_{\text{осн}} \quad \text{или} \quad X_M \leq X_{\text{осн}}(k_F - (k_U + k_T)), \quad (28)$$

где T – температура, °С, X_M – дополнительная погрешность, обусловленная геомагнитной активностью, k_U – коэффициент допустимого уровня погрешности, вызванной изменением напряжения питания относительно основной погрешности, k_T – коэффициент допустимого уровня погрешности, вызванной изменением температуры окружающей среды относительно нормальных условий, k_F – коэффициент допустимого уровня дополнительной погрешности относительно основной погрешности (k_F обычно выбирают из ряда 0,1; 0,15; 0,2 или 0,3, согласно ГОСТ 8.395-80 «Нормальные условия измерений при поверке»).

Результаты работы внедрены и активно используются в ряде организаций и учреждений различного профиля: АО Уфимское агрегатное производственное объединение (УАПО) холдинга «Технодинамика» Госкорпорации Ростех, ООО «НИИ ТС «Пилот», ООО «Центр ГИС-УГАТУ», ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) и др. Результаты также внедрены и используются ведущими российскими научными организациями: ФГБУН Геофизический центр РАН (ГЦ РАН); ФГБУН Институт физики Земли (ИФЗ) им. О. Ю. Шмидта РАН; ФГБУ Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова (ИПГ); «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Республике Башкортостан» (ЦСМ РБ) и др.

Широкое внедрение, апробация и испытания предложенных решений позволили провести анализ эффективности предложенных решений, а также определить граничные условия их применимости. Так, например, в результате применения предложенной концепции представляется возможным реконструировать до 99,6 % геомагнитных данных в авроральной зоне, при этом среднеквадратическая ошибка 86,7 % восстановленных значений не превышает 12 нТл. Вероятность отказа аврорального кластера системы составляет менее $1,6 \times 10^{-5}$, что соответствует 8 пропущенным значениям в год.

Границы применимости предложенных моделей определяются характером пространственного распределения физических свойств каждого кластера и, в случае аврорального кластера, характеризующегося максимальной информационной энтропией, составляют $\sim 1,6^\circ$ по широте и $\sim 12,3^\circ$ по долготе.

Пространственное разрешение визуализации пространственной геофизической информации в Арктическом регионе РФ увеличено в среднем 7,4 раза, при этом временное разрешение увеличено в 15 раз.

Также показано, что в Арктической зоне РФ с вероятностью $\sim 10^{-4}$ (~ 50 раз в год) возможны экстремальные региональные возмущения ГИТ и магнитного поля с $|J| > 13$ А, $|dB/dt| > 113$ нТл/мин и $|\Delta X| > 880$ нТл. При этом значимые вариации ГИТ ($|J| > 1$ А) наблюдаются с вероятностью $\sim 0,1$, что обеспечивает базу для принятия эффективных мер по модернизации высокоширотных технических систем, подверженных воздействию ГИТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе исследования была решена проблема разработки методологических основ обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений для повышения их эффективности в условиях низкой ситуационной осведомленности на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнитных данных) и получены следующие результаты:

1. Адаптированный комплекс параметров для оценки показателей надежности систем, моделей, методов и алгоритмов обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений (на примере высокоширотных геомагнитных данных), основанный на элементах теории надежности и отличающийся тем, что включает процедуру отбора, ранжирования (по значимости) и анализа связанных с данными показателями свойств анализируемых систем, моделей, методов и алгоритмов путем экспертной оценки корреляций параметров статистических моделей и факторов, влияющих на получение первичной информации.

2. Концепция обработки распределенной пространственной информации (на примере геомагнитных данных) в отраслевых системах поддержки принятия решений в условиях низкой ситуационной осведомленности, основанная на технологии агрегированных цифровых двойников и отличающаяся тем, что с целью повышения эффективности принятия решений предлагается создание и применение информационной системы агрегированных цифровых двойников технически сложных объектов, пространственная кластеризация которых основана на аппроксимации и анализе хвостов статистик распределений значений целевого параметра.

3. Комплекс математических моделей, методов и алгоритмов, которые реализуют в условиях низкой ситуационной осведомленности обработку, анализ и ретроспективный прогноз распределенной пространственной информации, основан на известных моделях и методах обработки и анализа данных и отличается тем, что с целью повышения эффективности аналитической обработки распределенной пространственной информации:

- предложено ансамблирование методов машинного обучения, геостатистики и статистического анализа, что позволило сократить вектор регрессоров модели цифрового двойника технического объекта и повысить надежность срабатывания модели на 22,1 %;

- разработана логическая модель интеграции цифровых двойников в процесс сбора и обработки распределенной пространственной информации, обеспечивающая автоматизированный контроль качества восстановления данных путем сравнительного анализа информации, получаемой с выхода цифрового двойника и его физического прототипа и повышающая за счет информационной избыточности отказоустойчивость системы сбора пространственных (геомагнитных) данных.

4. Комплекс функциональных подсистем для пространственного реконструирования и динамической мультимасштабной визуализации распределенной пространственной информа-

ции, получаемой с выхода разнородных агрегированных цифровых двойников и их физических прототипов, основанный на предложенных подходах к пространственной кластеризации опорных геодезических пунктов и отличающийся тем, что в MVC-архитектуру программного средства представления данных интегрированы модели трансформации, реализующие возможность сопряжения распределенной пространственной информации, синтезируемой на различных уровнях кластерной иерархии.

5. Экспериментальный прототип отраслевой проблемно-ориентированной системы поддержки принятия решений, основанной на предложенной архитектуре, полученных моделях, методах и алгоритмах, отличающийся тем, что благодаря кластерному подходу при интеграции разнородных физических и цифровых DTI-/DTA-двойников в единую систему, сопряженную с глобальной информационной средой пространственных данных и моделей, обеспечивается повышение эффективности принятия управленческих решений в условиях низкой ситуационной осведомленности.

6. Выполнен анализ эффективности предложенных решений (концепции, моделей, методов и алгоритмов), представляющих методологические основы обработки распределенной пространственной информации в отраслевых системах поддержки принятия решений в условиях низкой ситуационной осведомленности. Так, например, было показано, что информационные системы, построенные на их основе, позволяют реконструировать до 99,6 % геомагнитных данных в авроральной зоне, при этом среднеквадратическая ошибка 86,7 % восстановленных значений не превышает 12 нТл^2 ($\text{RMSE} \approx 3,5 \text{ нТл}$). Вероятность отказа аврорального кластера информационной системы составляет менее $1,6 \times 10^{-5}$, что соответствует 8 пропущенным значениям в год, которые, в свою очередь с минимальной ошибкой допустимо восстановить методом линейной интерполяции или кубического сплайна, что приближает эффективность предлагаемых решений к максимальному уровню. Пространственное разрешение визуализации геофизической информации в Арктическом регионе РФ (по сравнению с аналогами) увеличено в среднем 7,4 раза, при этом временное разрешение увеличено до 15 раз, что в совокупности с вышеперечисленными результатами обеспечивает повышение эффективности поддержки принятия решений при управлении сложными отраслевыми техническими системами высокоширотной инфраструктуры до 86,2 %.

Полученные в ходе выполнения работы результаты в виде технических и информационных систем, моделей, методов и алгоритмов внедрены в организации, предприятия и учреждения различных отраслей народного хозяйства (наука, промышленность, образование).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Воробьев А. В., Шакирова Г. Р. Автоматизированный анализ невозмущенного геомагнитного поля на основе технологий картографических веб-сервисов // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 5(58). С. 177–187. [[Vorobyov A.V., Shakirova G. R. "Automated analysis of an unperturbed geomagnetic field based on technologies of kar-toographic web services" // Vestnik UGATU. 2013. T. 17, No. 5 (58), pp. 177-187. (In Russian).]]
2. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Применение геоинформационных систем для мониторинга и аналитического контроля параметров космической погоды, геомагнитного поля и его вариаций // Информация и космос. 2016. № 1. С. 121–128. [[Vorobyov A. V., Vorobyova G. R. "The application of geoinformation systems for monitoring and analytical control of parameters of space weather, geomagnetic field and its variations" // Information and Cosmos. 2016. No. 1, pp. 121-128. (In Russian).]]
3. Воробьева Г. Р., Воробьев А. В. Подход к повышению производительности программных процессов обработки и хранения больших объемов геомагнитных данных // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 50. С. 23–30. [[Vorobieva G. R., Vorobyov A. V. "An approach to improving the productivity of software processes for processing and storing large volumes of geomagnetic data" // Bulletin of the Tomsk State University. Management, computer technology and informatics. 2020. No. 50, pp. 23-30. (In Russian).]]
4. Юсупова Н. И., Шахмаметова Г. Р. Интеграция инновационных информационных технологий: теория и практика // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14. № 4 (39). С. 112–118. [[N. I. Yusupova, G. R. Shahmametova, "Integration of innovative information technologies: theory and practice", (in Russian) // Vestnik UGATU, vol. 14, no. 4 (39), pp. 112-118, 2010.]]
5. Брекоткин В. Е., Брекоткина Е. С., Павлов А. С., Павлов С. В. Информационная технология подбора компонентов сложных технических систем на основе интеллектуального анализа их желаемых и фактических характеристик из распределенных баз данных // Системная инженерия и информационные технологии. 2022. Т. 4. № 2 (9). С. 13–23. [[Brekotkin V. E., Brekotkina E. S., Pavlov A. S., Pavlov S. V. "Information technology for selecting components of complex technical systems based on the intellectual analysis

of their desired and actual characteristics from distributed databases" // *System Engineering and Information Technologies*, 2022, vol. 4, no. 2 (9), pp. 13-23. (In Russian).]]

6. Воробьев А. В. Геоинформационные системы мониторинга магнитного поля Земли. Уфа: УГНТУ, 2015. [[Vorobyov A. V. *Geoinformation Systems for Monitoring the Magnetic Field of the Earth*. Ufa: UGNTU, 2015. (In Russian).]]

7. Воробьев А. В., Шакирова Г. Р. и др. Теория и практика создания информационных систем специального назначения. Уфа: УГАТУ, 2015. [[Vorobyov A. V., Shakirova G. R. et al. *Theory and Practice of Creating Information Systems for Special Purposes*. Ufa: UGATU, 2015. (In Russian).]]

8. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Метеоинформатика. Геомагнитные вариации и космическая погода. М.: Инновационное машиностроение, 2017. [[Vorobyov A.V., Vorobyova G. R. *Metoinomatics. Geomagnetic Variations and Cosmic Weather*. Moscow: Innovative MA-Shin Bust, 2017. (In Russian).]]

9. Vorobev A. V., Kolios S., Vorobeva G. R., Stylios C. *GIS and Environmental Monitoring. Applications in the Marine, Atmospheric and Geomagnetic Fields*. Springer, 2017.

10. Vorobev A. V., Shakirova G. R. Web-based information system for modeling and analysis of parameters of geomagnetic field // *Procedia Computer Science*. 2015. No. 59. Pp. 73–82.

11. Vorobev A. V., Zaiko A. I., Ivanova G. A., Vorobeva G. R. Magnetometer measurement system for the parameters of the geomagnetic field // *Measurement Techniques*. 2016. No 5. Pp. 532–536.

12. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Web-based geoinformation system for exploring geomagnetic field, its variations and anomalies // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. Vol. 582. Pp. 22–35.

13. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. "Web-oriented 2D/3D visualization of geomagnetic field and its variations parameters" // *Scientific Visualization*. 2017. Vol. 9, Issue 2, pp. 94-101.

14. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Information system for automated multicriterial analytical control of geomagnetic field and space weather parameters // *Communications in Computer and Information Science*. 2017. No. 741. Pp. 109–121.

15. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Evaluation of the influence of geomagnetic activity on metrological characteristics of inclinometric information measuring systems" // *Measurement Techniques*. 2017, pp. 1-6.

16. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. "Geoinformation system for amplitude-frequency analysis of geomagnetic variations and space weather observation data" // *Computer Optics*. 2017. No. 41 (6). Pp. 963–972.

17. Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Воробьева Г. Р., Христодуло О. И. Методология создания и перспективы применения проблемно-ориентированных цифровых двойников магнитных обсерваторий и вариационных станций // *Информационно-управляющие системы*. 2021. № 2. С. 60–71. [[Vorobyov A. V., Pilipenko V. A., Vorobyova G. R., Christodulo O. I. "Methodology for the creation and prospects of using pro-and-oriented digital doubles of magnetic observatories and variations" // *Information-Managing Systems*. 2021. No. 2, pp. 60-71. (In Russian).]]

18. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р., Христодуло О. И. Программная система пространственной визуализации прогностических и ретроспективных данных вероятности наблюдения полярных сияний // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 2. С. 225–233. [[Vorobyov A. V., Vorobyova G. R., Christol O. I. "The programmatic system of spatial visualization of prognostic and retrospective data probability of observing polar radiance" // *Scientific and Technical Bulletin of Information Technology, Mechanics, and Optics*. 2021. Т. 21, No. 2, pp. 225-233. (In Russian).]]

19. Воробьев А. В. Концепция многоуровневой системы цифровых двойников (на примере геомагнитных данных) // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2021. № 55. С. 26–34. [[Vorobyov A. V. "The concept of a multi-level system of digital doubles (for the example of geomagnetic data)" // *Bulletin of Tomsk State University. Management, computer technology and computer science*. 2021. No. 55, pp. 26-34. (In Russian).]]

20. Воробьев А. В., Христодуло О. И. Применение цифровых двойников в отраслевых системах поддержки принятия решений при обработке геофизической информации // *Перспективы науки*. 2021. № 4 (139). С. 186–189. [[Vorobyov A.V., Christodulo O. I. "The use of digital doubles in industry systems for supporting decisions in the processing of geophysical information" // *Prospects for Science*. 2021. No. 4 (139), pp. 186-189. (In Russian).]]

21. Воробьев А. В. Концепция информационного пакетного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика*. 2021. Вып. 4. С. 532–543. [[Vorobyov A. V. "The concept of information packet interaction in a multilevel system of digital twins" // *Bulletin of the Saratov University. New episode. Series Mathematics. Mechanics. Computer Science*. 2021. Issue. 4, pp. 532 543. (In Russian).]]

22. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Information system for automated multicriterial analytical control of geomagnetic field and space weather parameters // *Communications in Computer and Information Science*. 2017. No. 741. Pp. 109–121.

23. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Evaluation of the influence of geomagnetic activity on metrological characteristics of inclinometric information measuring systems// *Measurement Techniques*. 2017. Pp. 1–6.

24. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Geoinformation system for amplitude-frequency analysis of geomagnetic variations and space weather observation data// *Computer Optics*. 2017. No. 41 (6). Pp. 963–972.

25. 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.

26. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Correlation analysis of geomagnetic data synchronously recorded by the INTERMAGNET magnetic laboratories // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. Vol. 58. No. 2. Pp. 178–184.

27. Engebretson M. J., Pilipenko V. A., Ahmed L. Y., Posch J. L., Steinmetz E. S., Moldwin M. B., Connors M. G., Weygand J. M., Mann I. R., Boteler D. H., Russell C. T., Vorobev A. V. Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada: 1. Survey and statistical analysis // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. Vol. 124. No. 9. Pp. 7442–7458.
28. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., Selivanov V. N. Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet, and geomagnetically induced currents // *Solar-Terrestrial Physics*. 2019. Vol. 5. No. 1. Pp. 35–42.
29. 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. No. 20 (6).
30. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Enikeev T. A., Vorobeva G. R. Geoinformation system for analyzing the dynamics of extreme geomagnetic disturbances from observations of ground stations // *Computer Optics*. 2020. No. 44 (5). Pp. 782–790.
31. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Reshetnikov A. G., Vorobeva G. R., Belov M. D. Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters // *Scientific Visualization*. 2020. No. 12 (3). Pp. 108–118.
32. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Enikeev T. A., Vorobeva G. R., Khristodulo O. I. System for dynamic visualization of geomagnetic disturbances according to the data of ground magnetic stations // *Scientific Visualization*. 2021. Vol. 13. No. 1. Pp. 162–176.
33. Vorobev A. V., Pilipenko V. A. Geomagnetic data recovery approach based on the concept of digital twins // *Solar-Terrestrial Physics*. 2021. No. 7 (2). Pp. 48–56.
34. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Model of information interaction between elements of multilevel system of digital twins // *Informatics and Automation*. 2021. No. 20 (3). Pp. 530–561.
35. Воробьев А. В. Моделирование и исследование эффекта геомагнитной псевдобури // *Геоинформатика*. 2013. № 2. С. 29–36. [[Vorobyov A. V. Modeling and study of the effect of a geomagnetic pseudostorm // *Geoinformatics*. 2013. No. 2, pp. 29-36. (In Russian).]]
36. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Геоинформационная система для прогноза, контроля и спектрального анализа геомагнитного поля и его вариаций // *Геоинформатика*. 2016. № 1. С. 22–30. [[Vorobyov A. V., Vorobyeva G. R. Geoinformation system for forecasting, monitoring and spectral analysis of the geomagnetic field and its variations // *Geoinformatics*. 2016. No. 1, pp. 22-30. (In Russian).]]
37. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Методы резервирования в задачах восстановления временных рядов геомагнитных данных // *Информационные процессы*. 2018. Т. 18. № 1. С. 1–18. [[Vorobyov A. V., Vorobyeva G. R. Reservation methods in the problems of restoring time series of geomagnetic data // *Information Processes*. 2018. Vol. 18, No. 1, pp. 1-18. (In Russian).]]
38. Vorobev A. V., Shakirova G. R. Pseudostorm effect: computer modelling, calculation and experiment analyzes // *Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Albena, Bulgaria*. June 17-26. 2014. Vol. 1. Pp. 745–751.
39. Vorobev A. V., Shakirova G. R. Modeling and 2D/3D-visualization of geomagnetic field and its variations parameters // *Proceedings of the 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM-2015)*. 2015. Pp. 45–53.
40. Vorobev A. V., Shakirova G. R. Application of geobrowsers to 2D/3D-visualisation of geomagnetic field // *Proceedings of the 15th SGEM GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Albena, Bulgaria*. June 18-24. 2015. Vol. 1. Pp. 479-486.
41. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Geoinformation system for analytical control and forecast of the Earth's magnetosphere parameters // *GISTAM 2016 — Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. 2016. Pp. 193–200.
42. Воробьева Г. Р. Методологические основы обработки неоднородной пространственно-временной информации в системах поддержки принятия решений на основе технологий больших данных (на примере геомагнитных данных) // *Системная инженерия и информационные технологии*. 2023. Т. 5. № 3 (12). С. 3–26. [[Vorobyeva G. R. “Methodological foundations for processing heterogeneous spatial and temporal information in decision support systems based on Big Data technologies (on the example of geomagnetic data)” // *System Engineering and Information Technologies*, 2023, vol. 5, no. 3 (12), pp. 3-26. (In Russian).]]

Поступила в редакцию 24 июля 2023 г.

МЕТАДАННЫЕ / METADATA

Title: Methodological foundations of spatial information processing for decision support based on aggregated digital twins (on the example of high-latitude geomagnetic data).

Abstract: The article presents the results of the development of methodological foundations for processing distributed spatial information in industry decision support systems to improve their efficiency in conditions of low situational awareness based on aggregated digital twins (using high-latitude geomagnetic data as an example). To achieve this goal, the following tasks have been solved: • identification and analysis of the problem of processing distributed spatial information in industry decision support systems (on the example of high-latitude geomagnetic data), and an adapted set of parameters for assessing the reliability indicators of sources of such kind of information; • developed and formalized in the set-theoretical basis the concept of processing distributed spatial information in conditions of low situational awareness (on the example of geomagnetic data) in decision support systems based on the technology of aggregated digital twins of complex technical objects, and also proposed an approach to clustering its

sources; • a complex of mathematical models, methods and algorithms has been developed, which, in accordance with the proposed concept, implement the processing, analysis and retrospective forecast of distributed spatial information obtained from the output of heterogeneous digital and physical twins; • a set of functional subsystems for processing and dynamic multiscale visualization of distributed spatial information obtained from the output of aggregated digital twins and their physical prototypes (using satellite data, magnetic observatories and variational stations as an example) was developed; • an experimental prototype of a problem-oriented branch decision support system was developed, functionally connected with the system of aggregated digital twins, providing an increase in the efficiency of decision support in the operation of complex spatially distributed technical systems of high-latitude infrastructure; • an analysis of the effectiveness of the proposed concepts, models, methods and algorithms, which together represent the methodological foundations for processing distributed spatial information in industry decision support systems in conditions of low situational awareness, was carried out.

Key words: spatiotemporal information, heterogeneous data sources, information processing, restoration of time series

Язык статьи / Language: русский / Russian.

Об авторе / About the author:

ВОРОБЬЕВ Андрей Владимирович

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия. Проф. каф. геоинформационных систем. Дипл. магистр по электронике и микроэлектронике (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2006). Д-р техн. наук по системному анализу и обработке информации (там же, 2022). Иссл. в обл. интеллектуального анализа пространственных данных.

E-mail: geomagnet@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9680-5609>

URL: elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=238923

VOROBEV Andrei Vladimirovich

Ufa University of Science and Technologies, Russia. Prof., Dept. of Geoinformation Systems. Dipl. Master in electronics and microelectronics (Ufa State Aviation Technical University, 2006). Dr. of Tech. Sci. on system analysis and information processing (ibid, 2022). Research in the field of intellectual analysis of spatial data.

E-mail: geomagnet@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9680-5609>

URL: elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=238923