

УДК 004.65:550.38

© А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева

А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОГНОЗА, КОНТРОЛЯ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЕГО ВАРИАЦИЙ

Введение

В настоящее время во всем мире наблюдается рост потребности в данных геомагнитных измерений. Специалисты в области естественных и технических наук уделяют все большее внимание сопоставлению параметров геомагнитных вариаций (ГМВ) с тенденциями существования и развития под их влиянием объектов и систем различной природы происхождения и последующему анализу полученных результатов. Такой интерес обусловлен, прежде всего, тем, что согласно данным проводимых исследований (Чижевский А.Л., Вернадский В.И., Гвишиани А.Д., Гайдаш С.П., Гурфинкель Ю.И., Бинги В.Н.), геомагнитные вариации (ГМВ) и их различные комбинации могут существенно воздействовать как на живые организмы, так и на сложные технические объекты. Наведение помех связи, искажение или потеря сигнала GPS/ГЛОНАСС, выход из строя трансформаторных подстанций и линий электропередач, магнитное торможение спутников, ухудшение самочувствия людей – вот лишь небольшой перечень всех возможных последствий, к которым могут привести изменения (вариации) параметров геомагнитного поля (ГМП).

Регистрация параметров геомагнитного поля традиционно ведется как на поверхности Земли, так и из космоса. Так, среди наземных инструментов важнейшими являются магнитные обсерватории (их создание началось еще в 1830-х годах) и магнитовариационные станции, регистрирующие как полный вектор магнитного поля, так и его вариации. Согласно данным NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), ИФЗ РАН (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН), ИЗМИРАН (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, РАН), INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network), максимальная плотность магнитных обсерваторий приходится на территорию европейской части материка, при этом наблюдается их полное отсутствие в большинстве стран Азии,

Африки и Южной Америки, население которых по численности многократно превосходит страны Западной Европы. Измерения магнитного поля Земли из космоса в настоящее время осуществляются преимущественно европейской системой спутников Swarm.

Магнитометрические измерения регистрируются с различной периодичностью (каждую минуту, раз в час и т.д.) в зависимости от возможностей источника измерения. Объем накапливаемых при этом данных велик даже для одного источника, не говоря уже об интеграции нескольких или всех возможных источников информации. Большие объемы данных магнитометрических измерений негативно сказываются на оперативной обработке и анализе. В настоящее время отсутствуют или недостаточно эффективны методы и технологии обработки геомагнитных данных такой размерности (проблема Big Data), что в целом негативно сказывается на проведении исследований магнитного поля Земли и его вариаций.

Проблема еще более усугубляется тем, что на сегодняшний день отсутствует единое широкодоступное информационное пространство, в котором были бы представлены результаты всех доступных геомагнитных измерений, поэтому нельзя в любой момент времени оперативно оценить параметры геомагнитного поля в любой точке Земли. Причина тому – отсутствие самих данных о соответствующих геомагнитных измерениях или невозможность доступа к ним. В плане таких исследований широко известна международная система магнитных наблюдений INTERMAGNET. В пять международных центров этой системы стекаются потоки исходных данных обсерваторий INTERMAGNET разных стран. Сегодня на территории нашей страны работает восемь обсерваторий INTERMAGNET, что, очевидно, не дает полной картины магнитного поля по России в системе INTERMAGNET.

Еще один недостаток известных систем геомагнитных измерений заключается в том, что они

не предоставляют оперативной информации о параметрах космической погоды в любой момент времени. Известные сервисы (например, NOAA) отображают на собственных сайтах эту информацию, которая, однако, практически недоступна для обычных пользователей.

В этой связи актуальна задача создания единого информационного пространства для регистрации и анализа данных геомагнитных измерений как в России, так и по всему миру. Базовой технологией предложенного и реализованного авторами геопортала GEOMAGNET (<http://www.geomagnet.ru>) является комплекс геоинформационных технологий, сервис-ориентированной архитектуры и асинхронного программирования. Ключевая идея разработанного авторами решения основана на следующих ключевых элементах:

- 1) концепция единого информационного пространства геомагнитных измерений и космической погоды;
- 2) комплекс математических моделей, обеспечивающих расчет, моделирование и визуализацию комплекса параметров невозмущенного магнитного поля Земли;
- 3) метод сбора геопространственных данных геомагнитных измерений, основанный на интеграции известных источников геомагнитных измерений (магнитных обсерваторий, спутниковых данных, магнитовариационных станций) посредством преобразования в единый формат представления и последующего занесения в базу данных.

Общие сведения о магнитном поле Земли и его вариациях

Современная геотектоника полагает, что внутреннее ядро Земли жидкое, преимущественно металлическое и составляет ~1,7% от общей массы Земли, а железо и никель являются его основными компонентами и, вероятно, составляют массовую долю внутреннего ядра планеты ~90% и ~10% соответственно [1, 2].

Непрерывное вращение Земли в целом и ее ядра в частности обуславливают наличие в нем постоянных течений и вследствие динамо-эффекта соответствующих им электрических токов, обеспечивающих, согласно законам магнитной гидродинамики, наличие ГМП.

В случае единственности Земли в космическом пространстве, силовые линии магнитного поля планеты располагаются в виде симметричных дуг, протянувшихся от северного магнитного полюса к южному. В такой модели значение напряженности магнитного поля связано обратно пропорциональной

зависимостью с расстоянием от земного ядра до точки наблюдения.

В действительности магнитное поле Земли находится в непрерывном взаимодействии с магнитными полями, генерируемыми Солнцем, планетами Солнечной системы и другими небесными телами. В результате имеет место деформация формы магнитосферы, вносящая значительные поправки в законы существования и характер распространения идеализированной картины ГМП.

Таким образом, очевидно, что в силу сложной и неоднородной структуры ГМП его распределение по поверхности Земли имеет анизотропный характер. Так, установлено, что индукция ГМП на границе магнитосферы соответствует ~10,03 мТл, у поверхности Земли на экваторе – 20-30 мкТл, а у полюсов – 60-70 мкТл (рис. 1).

При этом полный вектор индукции ГМП, наблюдаемый в точке географического пространства, однозначно заданной пространственно-временными координатами (широта, долгота, высота над уровнем моря, год), можно определить как суперпозицию составляющих:

$$\mathbf{B}_{GE} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 + \mathbf{B}_3$$

где \mathbf{B}_1 – вектор индукции ГМП внутриземных источников; \mathbf{B}_2 – регулярная составляющая вектора индукции ГМП магнитосферных токов, вычисляемая в солнечно-магнитосферной системе координат; \mathbf{B}_3 – составляющая вектора индукции ГМП, имеющая техногенную (антропогенную) природу происхождения.

Магнитное поле внутриземных источников, генерируемое электрическими токами в земном ядре (главное поле), составляет ~98% всего поля, а поля земного магнетизма горных пород – лишь ~2% всего поля. При этом поле земной коры убывает с высотой значительно быстрее, чем главное поле, и, начиная с высоты ~100 км, им практически пренебрегают [3, 4].

Таким образом, составляющую \mathbf{B}_1 обычно принимают в качестве нормального или невозмущенного состояния ГМП, однако во многих случаях отдельно учитывается компонента, являющаяся результатом ненулевых магнитных свойств горных пород, относят ее, как правило, к геомагнитным аномалиям.

Информационные технологии для анализа и визуализации параметров геомагнитного поля и космической погоды

На сегодняшний день направление информационных технологий, связанное с эволюцией методов и аппаратно-программных средств в области ведения и анализа геопространственных данных, является одним из наиболее динамично развивающихся, что, с одной стороны, объясняется тем фактом, что более

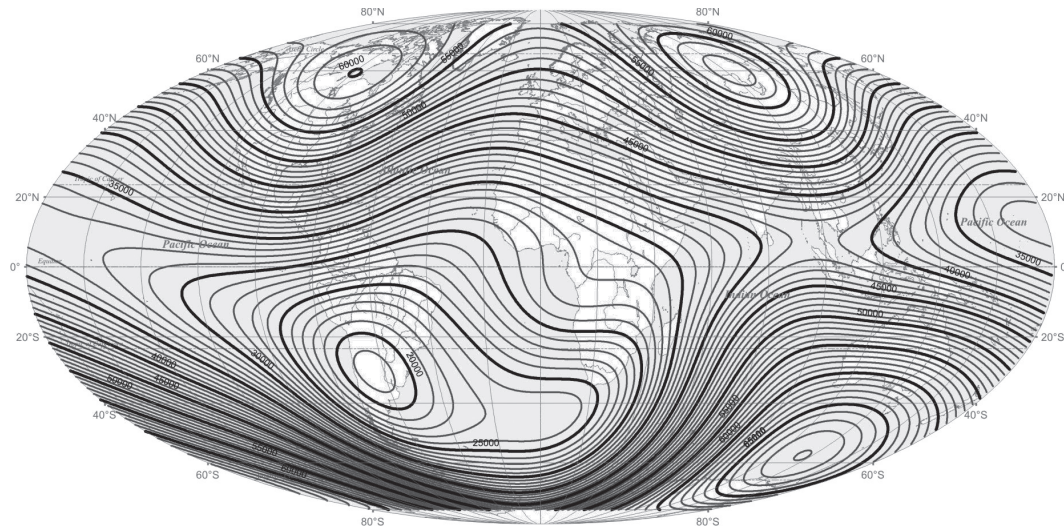


Рис. 1. Характер распределения полного вектора главного поля по поверхности Земли

80% всех данных имеет пространственную привязку, а с другой – стремительной эволюцией SQL- и поSQL-технологий.

Несмотря на широкий спектр известных и широкодоступных программно-инструментальных средств и технологий, параметры геомагнитного поля и его вариаций достаточно слабо поддержаны в плане применения современных информационных технологий. Вместе с тем актуальность и своевременность такого решения очевидна: только информационные технологии могут обеспечить обработку данных такого объема и сложности, которыми являются, по сути, данные геомагнитных измерений и расчетов.

В ГОСТ Р 52438-2005 понятие «пространственные данные» определено как данные о пространственных объектах, под которыми понимается цифровое представление реального объекта с указанием его местоположения и характеристик, а геоинформационная система (ГИС) – как система, оперирующая пространственными данными [5]. Геопространственная привязка данных геомагнитных измерений и расчетов позволяет классифицировать их как пространственные данные и применить для манипулирования ими современные геоинформационные технологии, обеспечивающие средства, методы и технологии, реализующие геопространственную привязку атрибутивных данных (в данном случае – параметров геомагнитного поля и его вариаций), их обработку, анализ и визуализацию.

Обзор и анализ в предметной области выявил, что в настоящее время, несмотря на широкий спектр специализированных ГИС, аппаратные средства и программные решения, обеспечивающие расчет, геопространственную привязку, визуализацию и анализ результатов вычисления параметров геомагнитного поля и его вариаций развиты крайне слабо. Так,

примером современного программного решения, имеющего признаки ГИС, является сервис, предлагаемый NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), доступный по адресу: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web>. Однако, хотя результаты вычислений и укладываются в приемлемые рамки погрешности, не требуется много времени, чтобы убедиться в некорректной работе ряда инструментов данного ресурса, отсутствии инструментов визуализации, неудачной геолокации, неинформативном интерфейсе и отсутствии многоязыковой поддержки. При этом следует отметить, что аналогичных отечественных разработок на текущий момент вообще обнаружено не было, при том что актуальность, научный и прикладной интерес в области создания такого программно-инструментального комплекса постоянно растет.

При этом важно отметить, что тенденции развития современных информационных технологий сместили вектор эволюции ГИС от настольных приложений в сторону веб-ориентированных решений, что послужило базой для формирования нового облачного информационного пространства, каждый элемент в котором имеет географическую привязку, впоследствии названного GeoWeb. Основой GeoWeb служит относительно новый класс веб-ГИС, сформированный на стыке веб- и ГИС-технологий и контролируемый международной организацией Open GIS Consortium (OGS).

В этой связи для решения поставленной задачи авторами предложена и разработана геоинформационная система (геопортал) GEOMAGNET (<http://www.geomagnet.ru>), обеспечивающая мониторинг, комплексный расчет и анализ, двух- и трехмерную визуализацию параметров геомагнитного поля и его вариаций в любой момент времени в любой точке

земной поверхности. Это позволит пользователям любого уровня подготовки обращаться к данным и использовать их для решения конкретных прикладных задач.

Основная концепция и инструментарий геопортала «GEOMAGNET»

На рис. 2 представлена схема концепции поликритериального дистанционного контроля параметров космической погоды, ГМП и его вариаций, реализующей парадигму интеграции гетерогенных источников данных в единое информационное пространство с кроссплатформенным механизмом их аналитической обработки и интерпретации, формализованная авторами в геопортале GEOMAGNET (<http://www.geomagnet.ru>).

Под кроссплатформенным здесь понимается программное обеспечение, работающее более чем на одной аппаратной платформе и/или операционной системе. Программно-алгоритмическая формализация предложенной концепции нацелена на улучшение показателей информативности и эффективности в задачах аналитического контроля магнитного поля Земли и ГМВ.

В рамках геопортала GEOMAGNET авторами реализованы интерактивные механизмы автоматизированного мониторинга, моделирования, аналитического контроля и прогноза параметров космической

погоды, ГМП его вариаций и аномалий в режиме реального времени (с шагом дискретизации 1 мин) на базе актуальных данных.

В основе разработанного авторами геопортала лежит следующий инструментарий средств ГИС (рис. 3) [6]:

- прямое и обратное геокодирование пространственных данных;
- интерпретация и визуализация геопространственных данных;
- геолокация (определение текущей геопозиции пользователя);
- подключение к данным ближайшей к месту нахождения пользователя магнитной обсерватории;
- виртуальный глобус (на базе технологии WebGL).

Кроме этого, в рамках данного геопортала авторами реализованы такие средства визуализации и интерпретации данных, как:

- многослойная визуализация пространственных данных с возможностью подключения пользовательских слоев (рис. 4, а) [7];
- визуализация двумерного массива с динамическим показателем масштабирования по оси времени (рис. 4, б).

Отличительной особенностью геопортала GEOMAGNET является реализованный авторами

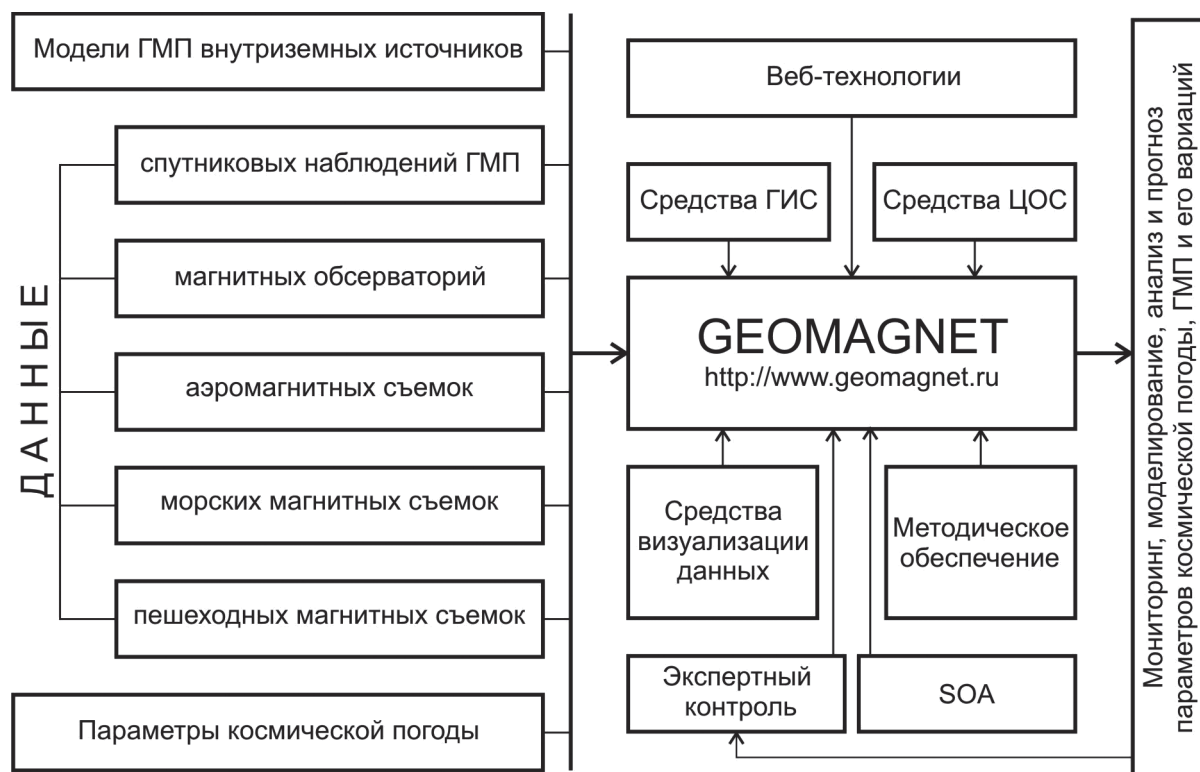


Рис. 2. Концепция поликритериального дистанционного контроля параметров космической погоды ГМП и его вариаций в многомерном пространстве

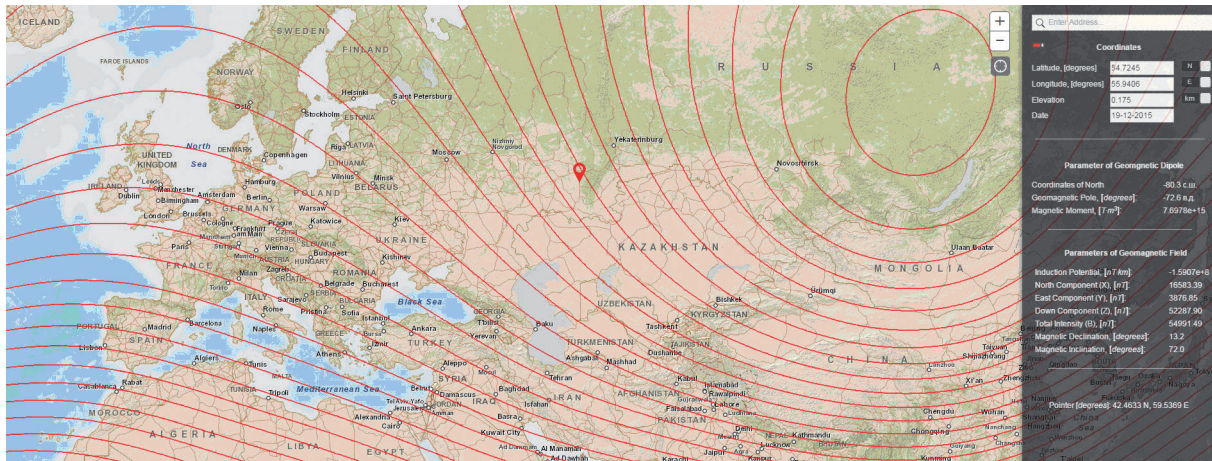
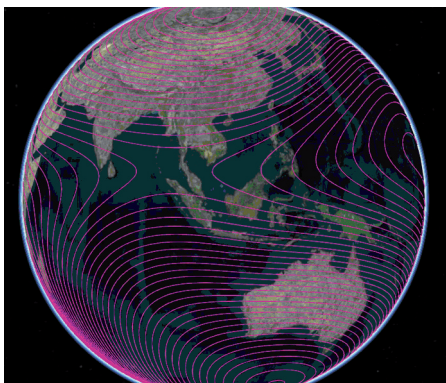
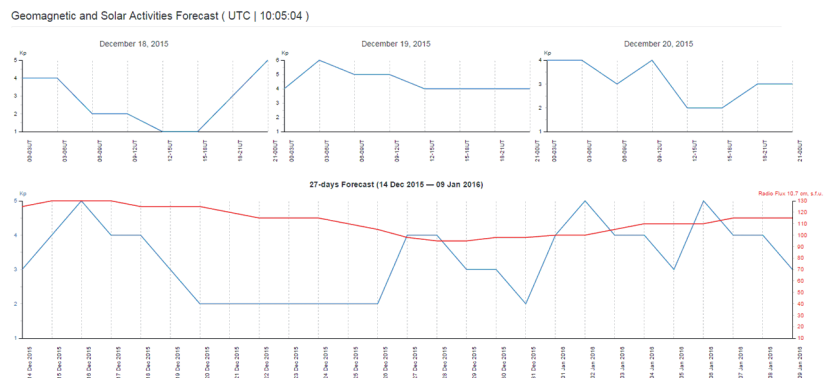


Рис. 3. Экранная форма, демонстрирующая пример применения геопортала GEOMAGNET для интерпретации и визуализации полного вектора главного поля (<http://geomagnet.ru/WMM/index.html>)



а



б

Рис. 4. Фрагменты экранных форм геопортала GEOMAGNET, деонстрирующих пример многослойной трехмерной визуализации геопространственных данных (а) и двухмерной интерпретации актуального прогноза параметров ГМВ на 3 и 27 суток (б). Методы цифровой обработки сигнала в GEOMAGNET

набор инструментов цифровой обработки параметров геомагнитного поля и его вариаций, основанный на принципах и механизмах цифровой обработки сигналов (ЦОС). Среди них:

- линейная, нелинейная и адаптивная фильтрация информационного сигнала (в основе которой лежит методика, представленная на рис. 5), обеспечивающая как подавление шума и селекцию сигнала в частотной области, так и анализ корреляций параметров смежных информационных сигналов (рис. 7);
- анализ сигнала во временной области, обеспечивающий расчет таких параметров информационного сигнала как максимальное, минимальное и среднее значения, а также дисперсия и среднееквадратическое отклонение;

- спектральный и частотно-временной анализ, реализуемый как посредством исследования периодограммы, т. е. за счет оценки спектральной плотности мощности, основанной на вычислении квадрата модуля преобразования Фурье последовательности данных с использованием статистического усреднения информационного сигнала (1), так и посредством оценки его вейвлет-скалограммы (рис. 8).

В общем виде методики цифровой фильтрации и анализа информационного сигнала, предложенные и реализованные авторами в рамках геопортала GEOMAGNET, могут быть представлены в виде схем, приведенных на рис. 5, 6.

Поясняя суть представленных на рис. 5, 6 методик, следует отметить, что на этапе 3 расчет

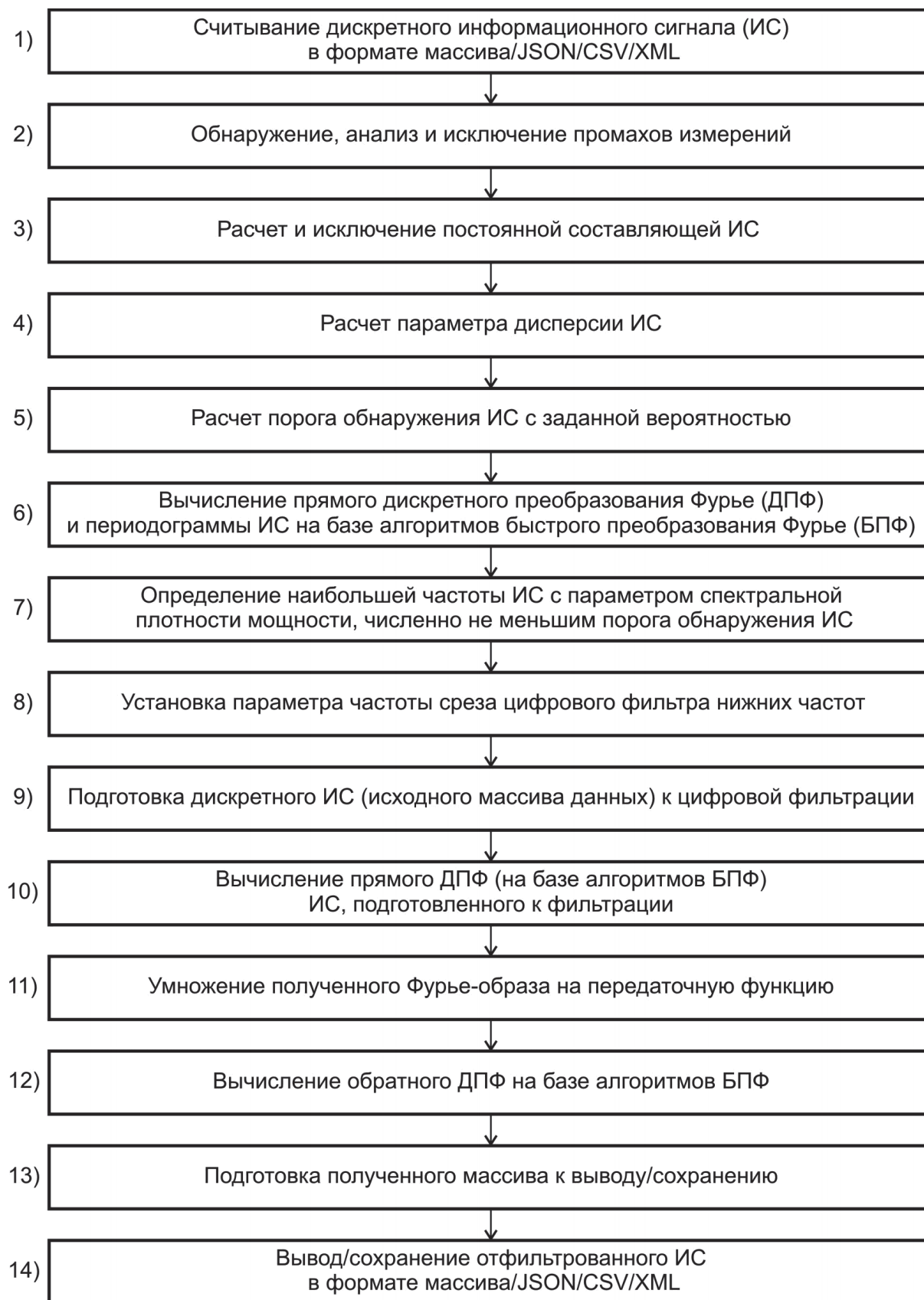


Рис. 5. Основная методика цифровой фильтрации информационного сигнала, применяемая в GEOMAGNET

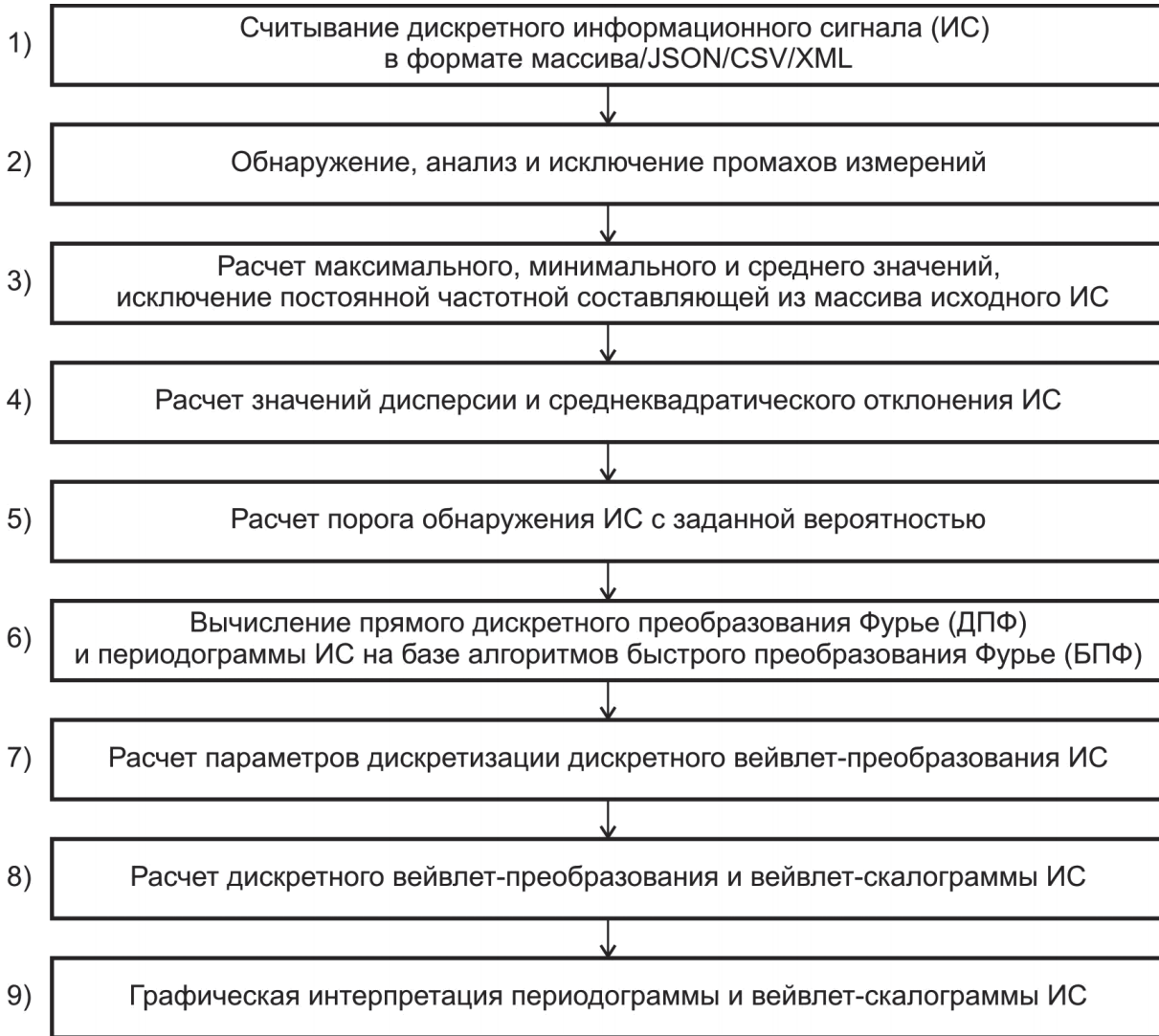


Рис. 6. Методика частотно-временного анализа информационного сигнала

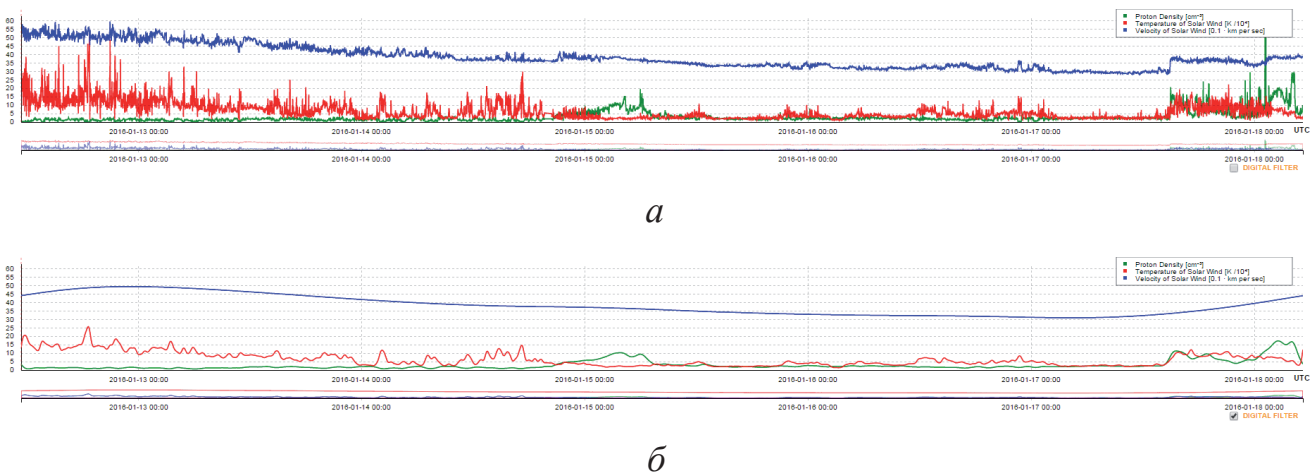


Рис. 7. Фрагменты экранных форм GEOMAGNET, демонстрирующих графическую интерпретацию информационного сигнала, получаемого с исследовательского искусственного спутника ACE (а), и результат линейной адаптивной фильтрации (б)

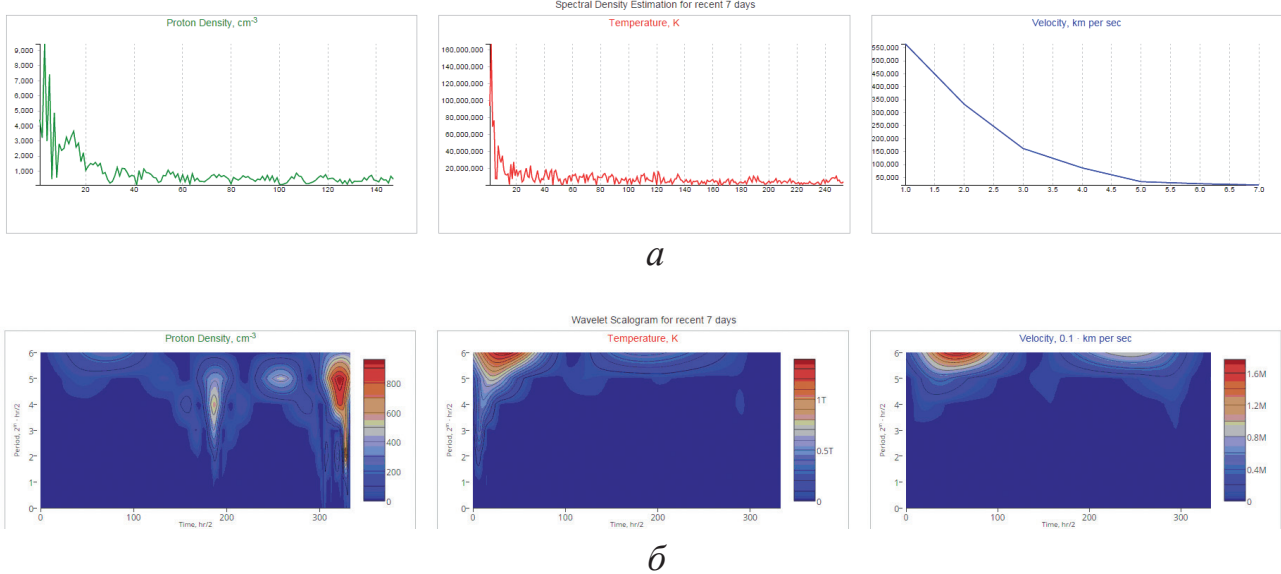


Рис. 8. Графическая интерпретация (посредством GEOMAGNET) селекции гармонического спектра информационного сигнала (а) и его вейвлет-скалограмма (б)

и исключение постоянной составляющей осуществляется согласно выражению:

$$x_k^* = x_k - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k, \quad (1)$$

где x_k^* – k -й элемент массива с исключенной постоянной составляющей, относительного исходного массива x_k ; N – размер массива.

На следующем этапе расчет параметров среднего квадратичного отклонения и дисперсии информационного сигнала осуществляется согласно выражению:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^*)^2, \quad (2)$$

где σ и σ^2 – среднее квадратичное отклонение и дисперсия информационного сигнала соответственно.

На этапе 5 (рис. 5-6) рассчитывается численное значение порога частотного обнаружения ИС l , определяемое согласно (3), в последующем позволяющее судить о наличии/отсутствии данной гармоники в составе информационном сигнале не в качестве составляющей белого шума, при этом вероятность такого утверждения составляет $1-q$, где $q \ll 1$ (например, в данном случае $q = 0,01$).

$$l = \frac{\sigma^2 X_q}{N}, \text{ где } X_q = -\ln(q). \quad (3)$$

На этапе 6 (рис. 5-6) периодограмма информационного сигнала рассчитывается на базе предварительно проведенного Фурье-преобразования дискретной функции с исключенной постоянной составляющей и определяется согласно (4), при этом в случае нечетного N вычисления ведутся до $(N+1)/2$:

$$D_j = \frac{1}{N^2} \left[(\text{Re } X_j)^2 + (\text{Im } X_j)^2 \right], \quad j = 0, 1, \dots, N/2, \quad (4)$$

где D_j – j -й элемент периодограммы; $\text{Re } X_j$ и $\text{Im } X_j$ – действительная и мнимая части фурье-преобразования, рассчитанные в соответствии с выражением:

$$X_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k^* e^{-i \frac{2\pi}{N} kj}, \quad j = 0, 1, \dots, N-1.$$

Таким образом, если Δt – шаг дискретизации исходного сигнала, отсчеты периодограммы соответствуют частотам:

$$\nu_j = \Delta \nu \cdot j, \quad j = 0, 1, \dots, N/2, \text{ где } \Delta \nu = \frac{1}{N \Delta t}.$$

На этапе 7 методики (рис. 6) рассчитываются параметры дискретизации для дискретного преобразования Фурье. Так, к примеру, максимальный уровень масштабирования a_{\max} будет определяться округленным в большую сторону значением, найденным из выражения:

$$a_{\max} = \log_2 \left(\frac{N}{2} \right). \quad (5)$$

На предпоследнем этапе в соответствии с выражением (6) рассчитывается дискретное вейвлет-преобразование информационного сигнала:

$$W(k, a_i, b_j) = \sum_{-N/2}^{N/2} \left[\frac{1}{\sqrt{a_i}} \cdot x_k^* \cdot \Psi \left(\frac{k-b_j}{a_i} \right) \right], \quad (6)$$

где $a_i = a_0^m$; $a_0 = 2$; $m = 0, 1, \dots, a_{\max}$; и его скалограмма:

$$S(a_i, b_j) = \left| W(a_i, b_j) \right|^2, \quad (7)$$

где Ψ – материнский вейвлет; a – параметр масштабирования; b – параметр сдвига ($b = -N/2, \dots, N/2$).

На этапах 9 и 13 (рис. 5) подготовка дискретного информационного сигнала к цифровой фильтрации и подготовка полученного массива к выводу/сохранению в обоих случаях заключается в умножении каждого элемента массива на значение $(-1)^i$, где i – порядковый номер соответствующего элемента массива.

Визуализация данных, полученных в результате применения предложенных авторами методик цифровой фильтрации и частотно-временного анализа информационного сигнала, в рамках геопортала GEOMAGNET реализована посредством набора графических веб-ориентированных библиотек класса D3.js (Data-Driven Documents – «документы, движимые данными»).

Инструмент визуализации D3.js – это JavaScript библиотека, ориентированная на работу с данными и их визуальное представление для Веб, включая загрузку данных, визуализацию в режиме реального времени и множество других возможностей. Его кроссплатформенность и веб-ориентированность обеспечивают доступность функционала по визуализации данных на портале GEOMAGNET для пользователей любых платформ и устройств.

Заключение

На сегодняшний день масштабы и актуальность проблемы эффективного контроля и анализа параметров ГМП и его вариаций имеют резко положительную динамику и окончательно не определены. При этом отсутствует единая концепция разработки методов и средств, в совокупности обеспечивающих оперативное моделирование, аналитический контроль и комплексный полигармонический анализ параметров ГМП и его вариаций.

В проводимых исследованиях предложена концепция поликритериального дистанционного контроля параметров ГМП и его вариаций в многомерном пространстве, реализующая парадигму интеграции гетерогенных источников данных (спутниковые наблюдения, магнитные обсерватории, аэро-, морская, пешеходная магнитные съемки и др.) в единое информационное пространство с кроссплатформенным (аппаратно-нейтральным) механизмом их аналитической обработки и интерпретации, обеспечивающая как развитие методов, так и эволюцию инструментальных средств в области исследования и аналитического контроля магнитного поля Земли и ГМВ.

На базе предложенной концепции разработан и реализован геопортал GEOMAGNET (<http://www.geomagnet.ru>), обеспечивающий контроль и высокоточный расчет комплекса параметров ГМП внутриземных источников с методической погрешностью, не превышающей 0,78%, усовершенствован метод интерпретации геомагнитных данных посредством двух- и трехмерного моделирования за счет применения веб-ориентированного инструментария ГИС и низкоуровневых средств поддержки компьютерной графики OpenGL, что в совокупности с применением современных ЦОС- и веб-технологий позволило в значительной степени повысить оперативность, информативность и эффективность процессов аналитического контроля и исследований в предметной области.

Работа поддержана грантами РФФИ 14-07-00260-а, 14-07-31344-мол_а, 10-07-00167-а, 15-17-20002-д_с, 15-07-02731-а, грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-5340.2015.9.

Ключевые слова: геоинформационные системы, геомагнитные вариации, геомагнитное поле, космическая погода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Allegre C.J. The Chemical-Composition of the Earth // Earth and Planetary Science Letters. – 1995. – No 134 (3-4). – P. 515-526.
2. McDonough W.F. Earth's Core // Encyclopedia of Geochemistry. – Kluwer Academic Publishers, 1999. – P. 151-156.
3. ГОСТ 25645.127-85. Магнитосфера Земли. Модель магнитного поля магнитосферных токов. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 11 с.
4. ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 23 с.
5. ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. – М. : Стандартинформ, 2006. – 14 с.
6. Vorobev A.V., Shakirova G.R. Web-Based Information System for Modeling and Analysis of Parameters of Geomagnetic Field // Procedia Computer Science. – 2015. – № 59. – С. 73-82.
7. Vorobev A.V., Shakirova G.R. Modeling and 2D/3D-visualization of geomagnetic field and its variations parameters // Proceedings of GISTAM 2015 : 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management. – 2015. – С. 35-42.