

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

А.В. Воробьев¹, Г.Р. Воробьева¹

¹ ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Самара

Аннотация

Представлен и описан способ корреляционного и амплитудно-частотного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды на основе концепции единого информационного пространства, моделей и методов вейвлет- и Фурье-анализа и геоинформационных технологий. Способ включает формализованные элементы математического и методического обеспечения для задач амплитудно-частотного и корреляционного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды и верифицируется посредством предложенного и разработанного авторами экспериментального образца платформонезависимой веб-ориентированной геоинформационной системы GEOMAGNET (<http://www.geomagnet.ru>). Для апробации способа использованы результаты наблюдений магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET, а также данные космической погоды, регистрируемые искусственным спутником Земли ACE.

Приводятся, обсуждаются и оцениваются полученные посредством системы GEOMAGNET результаты наблюдения, автоматизированного корреляционного и амплитудно-частотного анализа информационных сигналов, отражающих в режиме контрольного времени вариации параметров геомагнитного поля и космической погоды как на поверхности Земли, так и в околоземном пространстве.

Ключевые слова: вейвлеты, обработка информации, геомагнитные вариации, космическая погода, частотный фильтр, корреляционный анализ, информационная система.

Цитирование: Воробьев, А.В. Геоинформационная система для амплитудно-частотного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды / А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 963-972. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-963-972.

Введение

Широко известны и активно изучаются многочисленные негативные эффекты воздействия космической среды на объекты народного хозяйства, наиболее ярко проявляющиеся в периоды так называемых магнитных бурь (магнитное торможение спутников и спутниковые аномалии; дополнительные погрешности прецизионной магнитометрической аппаратуры и пр.) [1–3]. В этой связи особую значимость приобретают методы и средства регистрации, обработки и анализа данных наблюдений космической погоды и геомагнитных вариаций.

На сегодняшний день проблема мониторинга параметров геомагнитного поля (ГМП) и его вариаций решается посредством магнитных обсерваторий, аэромагнитных, гидромагнитных съемок, спутниковых и подземных скважинных наблюдений, а также с помощью портативных магнитометров различного принципа действия и динамического диапазона.

Однако в силу ряда причин, и в первую очередь благодаря объединению магнитных обсерваторий в единую мировую информационную сеть INTERMAGNET и открытому доступу к регистрируемым ими данным, именно они на сегодняшний день являются наиболее распространенным, достоверным и востребованным среди ученых и специалистов методом наблюдения параметров ГМП и его вариаций.

Мониторинг параметров космической погоды, в свою очередь, осуществляется преимущественно за счет наземных исследовательских станций наблюде-

ния галактических космических лучей (ГКЛ) и спутниковых исследовательских миссий. Так, в настоящее время известны около 13 космических миссий, в рамках которых более 20 космических аппаратов ведут многопараметровое наблюдение солнечного ветра в видимом, радиочастотном, инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазонах частот электромагнитного излучения.

Многообразие методов и средств измерений приводит к тому, что всевозрастающая энтропия неструктурированных данных и отсутствие единой концепции их обработки и интерпретации делает многоуровневые процессы анализа больших объемов данных в значительной степени неоперативными, трудозатратными и, как правило, имеющими низкие показатели автоматизации, экономической и социальной эффективности.

Так, во многих отраслях современной науки (медицина, геофизика, метеорология) серьезной проблемой является отсутствие современных информационных ресурсов, осуществляющих эффективный многопараметровый анализ данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды. Так, к примеру, актуальной и технически сложной задачей является проблема мониторинга параметров ГМП и его вариаций с целью оценки степени их влияния на метрологические характеристики геофизического оборудования в процессах их калибровки и эксплуатации. Это свидетельствует о том, что необходимость разработки такого рода информационных продуктов актуальна и давно назрела.

1. Источники данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды

В настоящее время основным информационным источником геомагнитных данных являются специализированные программные сервисы, предоставляемые следующими поставщиками.

1. Интермагнет объединяет в глобальную сеть более 120 постоянных цифровых магнитных станций, измеряющих значения комплекса параметров магнитного поля Земли и передающих в режиме квазиреального времени полученные (отчетные) данные в необработанном виде в специализированные информационные центры. Текстовые файлы данных сохраняются на выделенном FTP-сервере [8, 9, 11].

Средний объем файла с суточными геомагнитными данными одной магнитной станции варьируется от 50 до 100 Кб, а размер годового архива при этом достигает 40 Мб. Суммарный объем дискового пространства, необходимый для хранения годовых данных по всем доступным обсерваториям, составляет больше 3 Гб, что требует существенных аппаратных ресурсов для их локального применения. При этом именно локальное выделенное хранение геомагнитных данных является решением проблемы ускорения доступа к ним, поскольку время отклика при обращении к данным по протоколу FTP существенно выше, чем аналогичный отклик по протоколу HTTP.

2. Российско-украинский сегмент геомагнитных данных на базе Геофизического центра РАН располагает минутными и секундными данными, которые передаются с 18 магнитных станций, расположенных на территории России и Украины, а также регистрируемыми спутниками SWARM [5, 6, 12, 13]. Его отличительной особенностью является веб-сервис, обеспечивающий возможность получения геомагнитных данных для заданной обсерватории по одному или нескольким параметрам ГМП посредством GET-запросов в текстовом CSV-формате. Варьируя параметры (в стандартном формате GET) передаваемого сервису запроса возможно получать данные по определенной обсерватории за текущие сутки или за указанный временной интервал. Обращение к данным по протоколу HTTP обеспечивает приемлемую скорость получения отклика от сервиса, что выгодно отличает его от предыдущего подхода на основе протокола FTP. Вместе с тем пространственно ограниченный объем доступных геомагнитных данных (только 18 магнитных станций) не позволяет в достаточной мере интерпретировать параметры геомагнитной обстановки на протяженных территориях.

3. Национальное управление океанических и атмосферных исследований США (NOAA) располагает минутными данными о состоянии ГМП, передаваемыми в наземные центры обработки данных в режиме реального времени автоматическим искусственным спутником Земли ACE (Advanced Composition Explorer), запущенным NASA в рамках программы исследования Солнца и космического пространства. Данные, представленные в текстовом структурированном формате JSON

(<http://services.swpc.noaa.gov/text/ace-magnetometer.txt>), доступны для обращения по протоколу HTTP [7, 14]. Основная проблема этого поставщика данных состоит в том, что поток данных измерений содержит ошибочные замеры (произведенные некорректно или отсутствующие вовсе).

Конечный пользователь может оценить геомагнитную обстановку, запрашивая необходимую ему информацию посредством специализированных информационных сервисов, предоставляемых перечисленными поставщиками геомагнитных данных. Однако здесь имеет место ряд существенных препятствий, затрудняющих эффективную работу с ними. Во-первых, разрозненность и слабая согласованность источников и поставщиков геомагнитных данных приводят к тому, что для формирования целостной картины геомагнитной обстановки в заданной географической точке или области недостаточно данных только одного ресурса. Поиск релевантной информации и обращение к ней занимает неоправданно много времени, по истечении которого данные могут потерять актуальность. Во-вторых, отсутствие единого формата представления геомагнитных данных: одни ресурсы предоставляют данные в текстовом формате, другие – в графическом, и в результате конечный пользователь сталкивается с необходимостью применения для анализа и обработки данных дополнительных инструментально-программных средств (их наличие у пользователя и достаточный уровень квалификации для их применения – отдельная проблема). В-третьих, огромный объем геомагнитных данных, в результате чего извлечение данных осложняется и необходимостью выбора необходимого фрагмента из огромного набора значений, полученных источником данных (проблема «Big Data»). В-четвертых, известные информационные сервисы не предоставляют инструментария для анализа и обработки геомагнитных данных, поэтому пользователь получает по запросу данные в необработанном виде, включая шумы, пропуски и дублирование значений, зарегистрированное отсутствие сигнала от обсерваторий или спутников и пр. В этой связи имеют место ошибки, обусловленные человеческим фактором, что крайне негативно сказывается на достоверности результатов проведения мониторинга геомагнитной обстановки.

Как показывают известные исследования, очевидным и наиболее эффективным решением сложившейся проблемы является интеграция всех известных поставщиков геомагнитных данных в единое информационное пространство, предоставляющее конечным пользователям любого уровня подготовки единый механизм доступа к данным, а также инструментарий их интеллектуального анализа, обработки и визуализации.

2. Концепция информационного пространства для многопараметрового анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды

Решение обозначенной выше проблемы основано на интеграции геомагнитных данных, под которой будем понимать обеспечение единого унифициро-

ванного интерфейса к совокупности неоднородных независимых источников данных. При этом конечному пользователю системы интеграции геомагнитных данных информационные ресурсы всей совокупности интегрируемых источников представляются как новый единый источник – единое информационное пространство.

На рис. 1 приведена концепция построения единого информационного пространства, обеспечивающего сбор, гомогенизацию, обработку, хранение и комплексный анализ больших объемов непротиворечивых разнородных данных о параметрах магнитосферы и космической погоды.

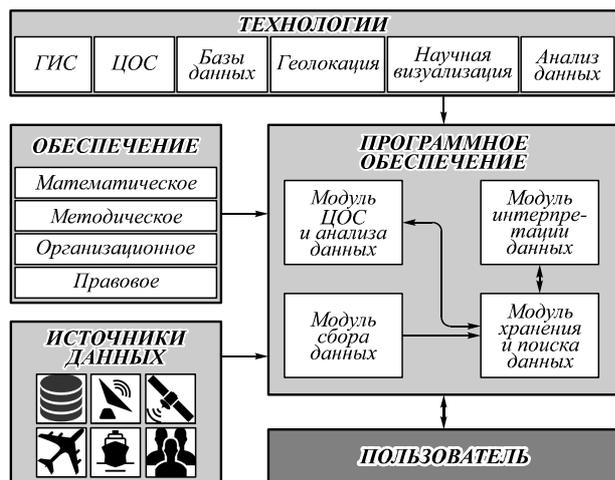


Рис. 1. Концепция единого информационного пространства для многопараметрового анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды

В основе предложенной концепции лежит модель многоуровневой интеграции физически гетерогенных структурированных (полуструктурированных) геомагнитных данных, регистрируемых наземными и космическими средствами, отличающаяся тем, что она объединяет отдельные источники данных с использованием аппарата метаданных, обеспечивающего семантическую гомогенизацию данных с возможностью последующего разрешения информационных коллизий посредством системы ограничений целостности. При этом доступ к данным на программном уровне предполагает декомпозицию пользовательского запроса на отдельные запросы, передаваемые соответствующим источникам данных. Ожидается, что такой подход позволит существенно сократить временные и трудовые затраты на поиск релевантной информации касательно геомагнитной обстановки применительно к разноформатным данным, размещенным в различных источниках под управлением различных методов доступа, а также обеспечит возможность аналитической обработки полученных данных пользовательским инструментарием для решения конкретных прикладных задач.

В соответствии с системным подходом интеграция геомагнитных данных реализуется на двух уровнях – логическом и физическом. На логическом уровне обеспечение доступа к геомагнитным данным многих

источников через единый интерфейс реализуется представлением (отображением) всей совокупности данных из множества независимых источников в терминах единой информационной модели. На физическом уровне интеграции в рамках построения единого информационного пространства используется подход, известный как актуальное (материализованное) представление интегрируемых данных. При этом формируется полное материализованное представление интегрируемых геомагнитных данных, отчужденное от исходных источников и сосуществующее с ними.

Для реализации предложенной модели интеграции гетерогенных геомагнитных данных в концепции приведены программные средства, которые представляют собой совокупность четырех интегрированных программных модулей:

1. Модуль сбора данных реализует интеграцию и предварительную обработку геомагнитных данных, полученных из гетерогенных источников (аэрофотосъемка, геодезические исследования, спутниковые данные, данные обсерваторий и (или) метеостанций и др.). Приоритетной задачей этого модуля является унификация представления разнородных по происхождению и формату данных.

2. Модуль хранения и поиска данных позволяет формулировать программные запросы, результатом выполнения которых является контекстно-связанная информация, представленная в формате соответствующей модели данных (реляционной, сетевой, иерархической и т. д.). Основное назначение данного модуля – агрегирование, фильтрация и классификация наборов данных для их дальнейшего анализа и интерпретации.

3. Модуль цифровой обработки сигнала и анализа данных служит для функционального манипулирования наборами метеоданных посредством пространственно-временного, частотного, статистического и иных видов анализа с целью получения новых данных, служащих основой в том числе для информационной поддержки принятия решений в проблемной области.

4. Модуль интерпретации данных предназначен для представления данных в любой удобной для пользователя форме (диаграммы, таблицы, отчеты, двух- и трехмерные графические модели и пр.). Основным назначением этого модуля является формирование интерфейса конечного пользователя как промежуточного звена между поставщиком и потребителем метеоданных, реализующего визуальные элементы для управления механизмами формирования запросов и рендеринга откликов.

С учетом вышесказанного можно сделать вывод, что предложенная концепция единого информационного пространства отличается тем, что реализует парадигму интеграции единого хранилища унифицированных данных с современными методами их обработки, анализа и проблемно-ориентированной (геологической, экологической, метеорологической и др.) интерпретации, что способствует повышению как

научного выхода исследовательских групп, так и качественных показателей оперативности и экономической эффективности такого рода наблюдений.

3. Формализация и верификация геоинформационной системы для амплитудно-частотного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды

На основе концепции единого информационного пространства для многопараметрового наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды, а также за счет применения веб-ориентированного инструментария геоинформационных систем (ГИС) и низкоуровневых средств поддержки компьютерной графики OpenGL, с использованием результатов, описанных в предыдущих параграфах, разработана и формализована платформенезависимая информационная система «GEOMAGNET», обеспечивающая

оперативный мониторинг и многопараметровый анализ данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды [15]. Названная система унаследовала следующий инструментарий средств ГИС, адаптированный под предметную область:

- прямое и обратное геокодирование пространственных данных;
- преобразование координат из географической системы в геомагнитную и обратно;
- графическая интерпретация геопространственных данных (рис. 2);
- геолокация (определение текущей геопозиции пользователя);
- сканирование, отображение, трансляция и анализ данных с доступных магнитных обсерваторий (по лицензии INTERMAGNET и ГЦ РАН);
- виртуальный глобус, реализованный на базе технологии WebGL.

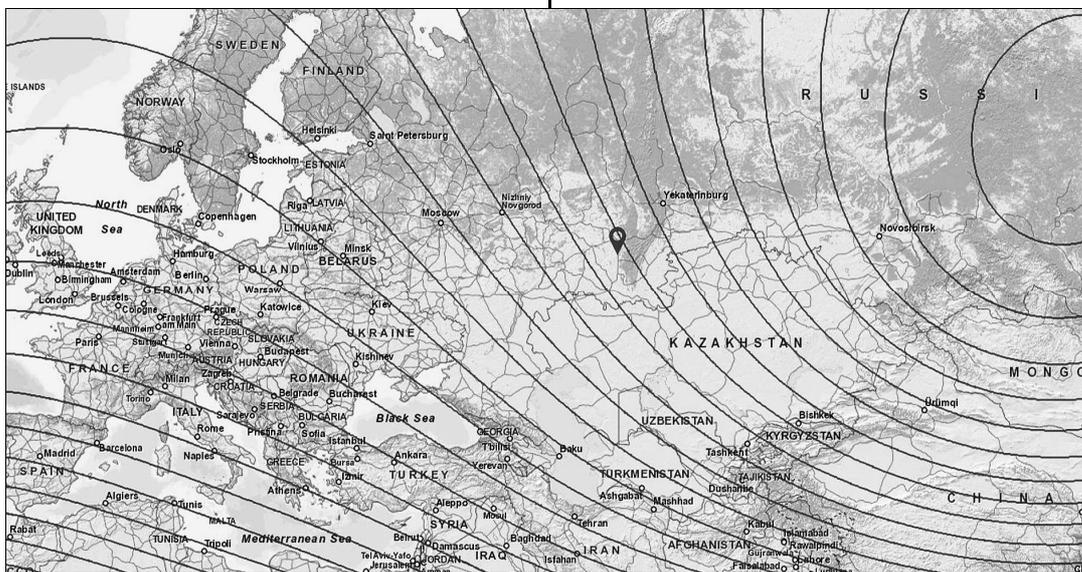


Рис. 2. Экранные формы работы ГИС GEOMAGNET: графическая интерпретация распределения главного поля по поверхности Земли

Исследование и анализ методической погрешности результатов математического моделирования и графической интерпретации параметров космической погоды, геомагнитного поля и его вариаций показали, что она не превышает 0,78 %.

Кроме этого, разработанная система включает в себя набор инструментов цифровой обработки данных применительно к данным наблюдения космической погоды, ГМП и его вариаций. Среди них следует выделить следующие:

- линейная, нелинейная и адаптивная фильтрация информационного сигнала, обеспечивающая как подавление шума и селекцию сигнала в частотной области, так и анализ корреляций параметров смежных информационных сигналов;
- анализ сигнала во временной области, обеспечивающий расчет таких параметров информационного сигнала, как максимальное, минимальное и среднее значения, а также дисперсия и среднеквадратическое 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, так и посредством оценки его вейвлет-скалограммы.

Кроме этого, в информационной системе GEOMAGNET реализованы и поддерживаются такие средства визуализации и интерпретации данных, как:

- многослойная визуализация пространственных данных с возможностью подключения и отображения пользовательских KML/KMZ-слоев;
- визуализация двумерного массива с динамическим показателем масштабирования по оси времени на базе графических веб-ориентированных библиотек класса D3.js – Data-Driven Documents;

– 2D- и 3D-визуализация геопространственных данных с инвариантным относительно уровня масштабирования показателем детализации.

4. Амплитудно-частотный анализ данных наблюдений геомагнитных вариаций и космической погоды

Одной из отличительных функциональных возможностей предлагаемого подхода является инструментарий многопараметрового анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды. В основе его математического и методического обеспечения лежат методики, обеспечивающие цифровую обработку информационного сигнала (ИС) и его вейвлет-анализ.

Предлагаемые авторами методики цифровой обработки и частотно-временного анализа геомагнитных данных и параметров космической погоды приведены на рис. 3–4.



Рис. 3. Методика цифровой обработки информационного сигнала (ИС – информационный сигнал)

Методики обладают рядом общих этапов. Так, на этапе 3 данных выполняется расчет и исключение постоянной составляющей:

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

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

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

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

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

На этапе 5 рассчитывается численное значение порога частотного обнаружения ИС, определяемое согласно (3) и 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 $q \ll 1$ (в данном случае $q = 0,03$):

$$l = \frac{\sigma^2 X_q}{N}, \tag{3}$$

где $X_q = -\ln(q)$.



Рис. 4. Методика частотно-временного анализа информационного сигнала

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

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

$j = 0, 1, \dots, N/2,$

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:

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

На этапе 7 методики частотно-временного анализа геомагнитных данных 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:

$$a_{\max} = \log_2(N/2).$$

На предпоследнем этапе той же методики рассчитывается дискретное вейвлет-преобразование информационного сигнала:

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

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

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

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

На этапах 9 и 13 методики цифровой обработки геомагнитных данных предусмотрена подготовка дискретного информационного сигнала к цифровой фильтрации. 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, что в результате обеспечивает отсчет гармоник от начала координат.

Для апробации предложенных методик обработки геомагнитных данных и параметров космической погоды были проанализированы тестовые выборки геомагнитных данных, зарегистрированных обсерваторией Cheongyang (CYG, 53.63° N; 126.854° E) за период с 19 по 21 февраля 2016 г, а также параметры солнечного ветра (концентрация, температура, скорость) за период с 21 по 23 октября 2016.

Результаты соответствующей визуализации вейвлет-скалограмм приведены на рис. 5. Детальный анализ приведенных вейвлет-скалограмм позволил сделать следующие выводы:

- вариации ГМП в наблюдаемый период имели максимальную частоту в направлении оси Y ,
- изменение температуры солнечного ветра в период наблюдения имело более высокочастотный характер по сравнению с параметрами его концентрации и скорости.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных методик анализа геомагнитных вариаций и космической погоды, что позволяет применять их для аналитической обработки больших объемов зарегистрированных значений параметров с приемлемой точностью и оперативностью.

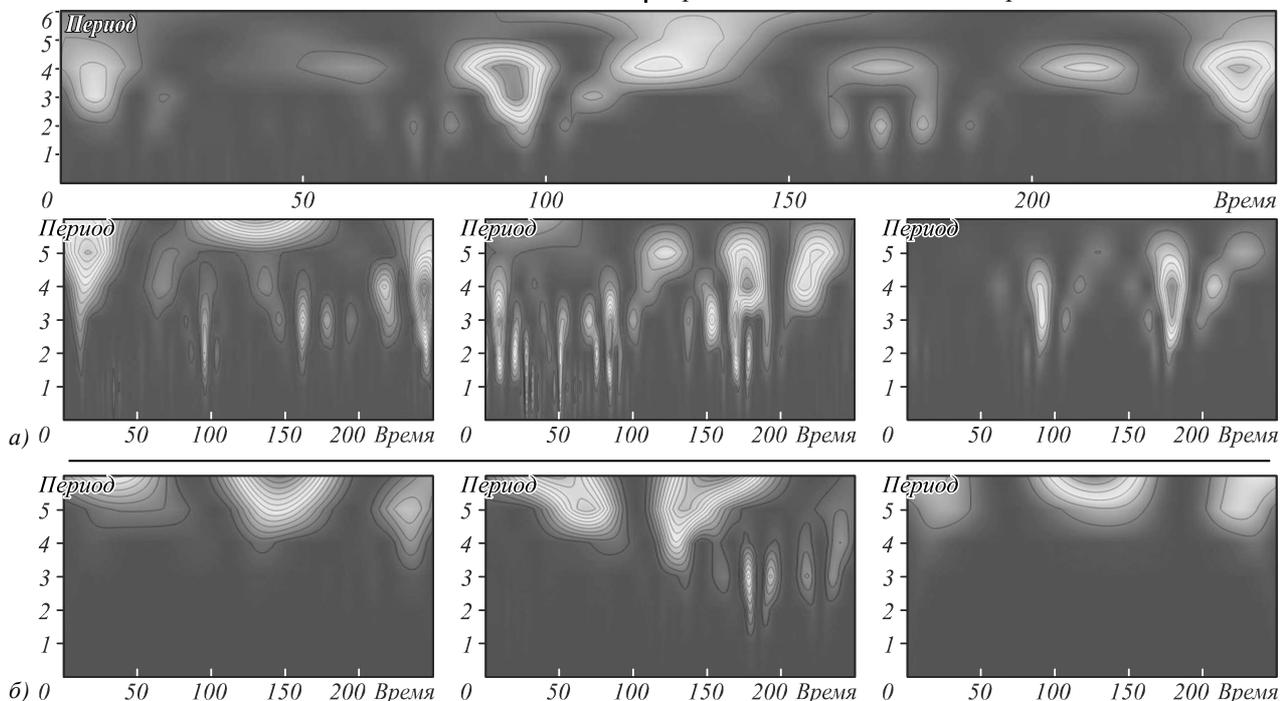


Рис. 5. Вейвлет-скалограммы как результат работы информационной системы для многопараметрового анализа результатов наблюдения геомагнитных вариаций: а – вариации ГМП по данным магнитной обсерватории CYG за период с 19 по 21 февраля 2016 г; б – параметры солнечного ветра (слева направо – концентрация, температура, скорость) за период с 21 по 23 октября 2016 г.

5. Корреляционный анализ данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды

Взаимозависимость геомагнитных данных и параметров космической погоды предлагается оценить на основе методов корреляционного анализа. Как известно, математической мерой корреляции двух случайных величин обычно служит корреляционное отношение либо коэффициент корреляции, метод расчета которого зависит от вида шкалы, к которой относятся переменные [4, 10].

Так, например, для измерения переменных с интервальной и количественной шкалами следует использовать коэффициент корреляции Пирсона:

$$R_{XY} = \frac{cov_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y - \bar{Y})^2}}, \quad (5)$$

где $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t$ и $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Y_t$ – средние значения выборок X и Y соответственно.

Важно отметить, что для корректного расчета данного коэффициента корреляции необходимо, чтобы количество значений в исследуемых переменных X и Y было одинаковым, исследуемые переменные X и Y были распределены нормально и измерены в интервальной шкале или шкале отношений.

Таким образом, согласно принятым ограничениям относительно размерности и характера рядов данных, корреляционный анализ производился по наборам качественно однородных данных, включающих 10 080 или 16 384 значений, что в результате обеспечило взаимопогашение случайных колебаний.

С учетом вышесказанного была подготовлена экспериментальная выборка из 10 080 значений параметров космической погоды. Результаты проведенного эксперимента по выявлению корреляционных связей между различными параметрами космической погоды (скорость, концентрация и температура солнечного ветра) посредством оценки коэффициента корреляции Пирсона приведены в табл. 1.

Табл. 1. Коэффициенты корреляции Пирсона для параметров солнечного ветра

	Плотность	Скорость	Температура
Плотность	1	-0,45	-0,22
Скорость	-0,45	1	0,75
Температура	-0,22	0,75	1

Результаты эксперимента показали следующее:

- максимальной корреляционной связью обладают параметры скорости и температуры солнечного ветра;
- скорость и плотность связаны отрицательной корреляционной связью;
- корреляция между значениями температуры и плотности солнечного ветра наименее значительна.

Если рассматривать параметры скорости и температуры солнечного ветра в контексте теплового движения, то выявленная корреляционная зависимость объясняется соотношением:

$$v_T = \left[\int_0^{\infty} v^2 f(v) dv \right]^{1/2},$$

где $f(v)$ – функция распределения частиц по скоростям.

Или в случае максвелловского распределения по скоростям выражением:

$$v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}},$$

где m – масса частицы, k – постоянная Больцмана.

Обратная корреляционная зависимость между скоростью и плотностью потока солнечного ветра объясняется тем, что с увеличением количества частиц на единицу объема увеличивается частота ионных столкновений, уменьшается средняя длина их свободного пробега и, следовательно, уменьшается скорость потока плазмы солнечного ветра.

Аналогичным образом были исследованы корреляционные зависимости между геомагнитными данными, регистрируемыми разнесенными в пространстве постоянными магнитными станциями (рис. 6).

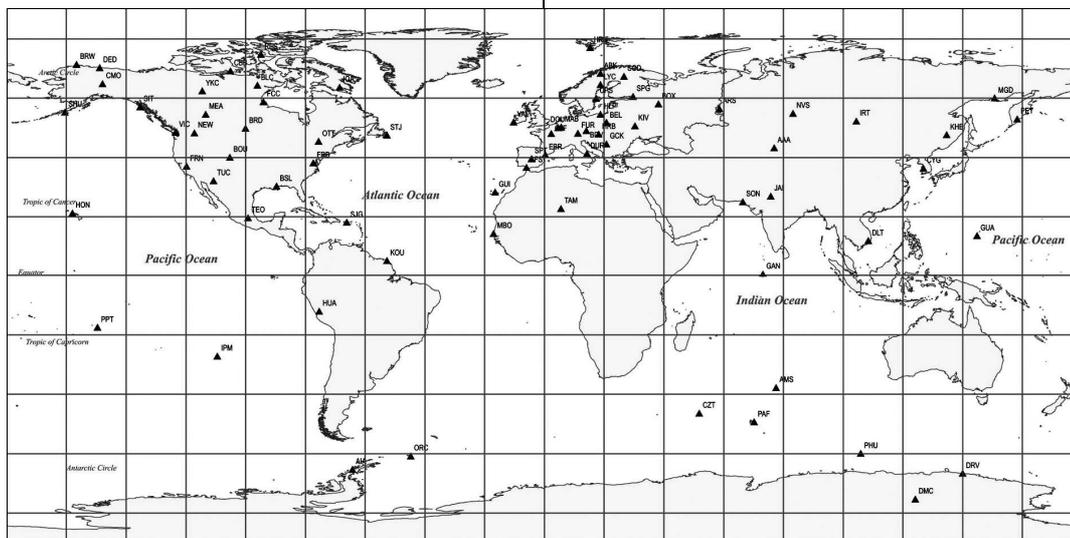


Рис. 6. Распределение магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET

Анализ данных, представленных как в табл. 2, так и аналогичных для других обсерваторий, выявил, что коэффициент корреляции Пирсона геомагнитных данных, регистрируемых разнесенными в пространстве магнитными станциями, занимает интервал от долей процента до практически абсолютной идентичности, что зависит преимущественно от взаимной удаленности двух станций как по широте (в большей степени), так и по долготе (рис. 7).

В табл. 2 в качестве примера приведены результаты расчета коэффициента корреляции геомагнитных данных полного вектора ГМП, регистрируемых обсерваторией «Dourbes» (DOU), с аналогичными данными, регистрируемыми другими 74 доступными на исследуемый период магнитными станциями.

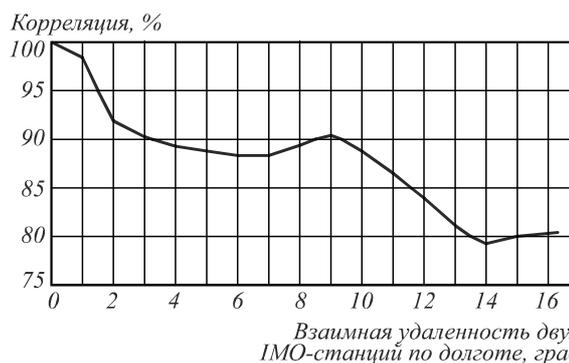


Рис. 7. Зависимость коэффициента корреляции Пирсона, % геомагнитных данных полного вектора ГМП от их взаимной удаленности по географической долготы

Табл. 2. Коэффициенты Пирсона для корреляции значений полного вектора ГМП, регистрируемых обсерваторией DOU с аналогичными данными иных магнитных станций, %

AAA	ABK	AIA	AMS	ARS	BDV	BEL	BLC	BOU	BOX	BRD
10,5	14,4	46,0	44,7	17,9	89,9	67,2	48,5	23,7	4,0	26,2
BRW	BSL	CBB	CLF	CMO	CYG	CZT	DED	DLT	DMC	DOU
25,5	21,1	36,2	91,1	12,5	19,1	61,9	42,6	22,8	6,6	100,0
DRV	DUR	EBR	FCC	FRD	FRN	FUR	GAN	GCK	GUA	GUI
23,3	66,1	64,3	21,1	3,8	38	88,3	9,1	80,3	27,7	14,1
HON	HLP	HRB	HRN	HUA	IPM	IQA	IRT	JAI	KHB	KIV
24,5	49,6	79,8	26,1	7,6	7,9	10,0	7,3	19,5	27,4	68,8
KOU	LYC	MAB	MBO	MEA	MGD	NEW	NVS	ORC	OTT	PAF
20,8	12,7	98,0	42,7	35,2	6,2	9,3	33,7	28,3	31,1	1,6
PET	PHU	PPT	RES	SFS	SHU	SIT	SJG	SOD	SON	SPG
7,0	23,1	32,8	23,8	46,4	8,4	35,8	33,8	18,8	25,0	2,8
SPT	STJ	TAM	TEO	TUC	UPS	VAL	VIC	YKC	-	-
52,2	35,9	18,1	29,0	35,4	8,4	79,8	4,5	31,2	-	-

Изучение и анализ получаемых таким образом данных показали, что взаимная удаленность двух магнитных станций в пределах 15° по долготе и 3,5° по широте (например, GCK и DOU, BRW и DED, GCK и FUR, VIC и NEW, ABK и SOD, SON и JAI, DOU и MAB и др.), как правило, обеспечивает корреляцию геомагнитных данных этих станций не хуже 75%. Дальнейшие эксперименты показали, что зависимость, представленная на рис. 7, в общем виде справедлива как для полного вектора ГМП, так и для его составляющих.

Исследование частотного спектра информационного сигнала с использованием методик, представленных на рис. 3–4, показало, что спектральная плотность информационного сигнала, одновременно регистрируемого разнесенными в пространстве обсерваториями, также может заметно отличаться от станции к станции.

Результаты проведенного корреляционного анализа геомагнитных данных использованы для суждения о достаточном (или избыточном) количестве магнитных станций на единицу площади. Так, при условии порогового значения коэффициента корреляции Пирсона, заданного равным 90%, следует вывод о низкой эффективности расположения станций NEW, VIC, DOU, CLF и MAB сети INTERMAGNET.

Изложенные выше результаты и полученные выводы имеют определенную практическую значимость в ряде задач, связанных с пространственной ориентацией

геофизического оборудования, оценкой уровня зашумленности магнитных обсерваторий; обоснованием выбора местоположения новых станций; интерполяцией и экстраполяцией геомагнитных данных при частичной потере таковых на конкретной обсерватории и в других приложениях (имеется в виду возможная взаимозаменяемость геомагнитных данных для станций с высокой степенью корреляции в случае отсутствия данных за некоторый временной период).

Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложена и формализована концепция построения единого информационного пространства, обеспечивающего сбор, гомогенизацию, обработку, хранение и многопараметровый анализ больших объемов непротиворечивых разнородных данных о параметрах геомагнитного поля, его вариациях и космической погоде, отличающаяся от известных тем, что реализует парадигму интеграции единого хранилища данных с современными методами их цифровой обработки, анализа и интерпретации.

На базе предложенной концепции разработана и внедрена в ряд профильных организаций специализированная платформонезависимая геоинформационная система GEOMAGNET, которая помимо повышения оперативности и научного выхода проводимых ими исследований, обеспечила значимый социально-экономический эффект, заключающийся в повышении эффек-

тивности проведения научно-исследовательских работ в данной области, а также в снижении трудоемкости процессов корреляционного/амплитудно-частотного анализа данных и повышении конкурентоспособности и российских информационных систем такого рода.

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ 15-07-02731-а.

Литература

1. **Гурфинкель, Ю.И.** Ишемическая болезнь сердца и солнечная активность / Ю.И. Гурфинкель. – М.: ИИЦ Эльф-3, 2004. – 168 с. – ISBN: 5-88982-031-1.
2. Солнечно-земные связи и космическая погода / под ред. А.А. Петруковича. – В книге: Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зеленого, И.О. Веселовского. – Т. II. – Гл. 8. – М.: Физматлит, 2008. – С. 175-257. – ISBN: 978-5-9221-1041-9.
3. **Хаин, В.Е.** О возможном влиянии солнечной активности на сейсмическую и вулканическую активность: долгосрочный прогноз / В.Е. Хаин, Э.Н. Халилов // Science without borders. Transactions of the International Academy of Science H&E. – 2007/2008. – Vol. 3.
4. **Харченко, М.А.** Корреляционный анализ: учебное пособие для вузов / М.А. Харченко. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. – 31 с.
5. **Gvishiani, A.** Survey of geomagnetic observations made in the northern sector of Russia and new methods for analysing them / A. Gvishiani, R. Lukianova, A. Soloviev, A. Khokhlov // Surveys in Geophysics. – 2014. – Vol. 35(5). – P. 1123-1154. – DOI: 10.1007/s10712-014-9297-8.
6. **Hamoudi, M.** Wavelet analysis of ionospheric disturbances / M. Hamoudi, N. Zaourar, R. Mebarki, L. Briquet, M. Parrot // EGU General Assembly. – 2009. – Vol. 11. – P. 8523.
7. **Dawson, E.** The british geological survey's new geomagnetic data web service / E. Dawson, J. Lowndes, P. Reddy // Data Science Journal. – 2013. – Vol. 12. – P. WDS75-WDS80. – DOI: 10.2481/dsj.WDS-010.
8. **Kerridge, D.** INTERMAGNET: Worldwide near real-time geomagnetic observatory data / D. Kerridge // ESA Space Weather Workshop. – 2001. – P. 1-4.
9. **Love, J.** An international network of magnetic observatories / J. Love, A. Chulliat // EOS, transactions American Geophysical Union. – 2013. – Vol. 94, Issue 42. – P. 373-374. – DOI: 10.1002/2013EO420001.
10. **Mukaka, M.M.** Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research / M.M. Mukaka // Malawi Medical Journal. – 2012. – Vol. 24, Issue 3. – P. 69-71.
11. **Rasson, J.** Observatories, intermagnet / J. Rasson. – In book: Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism / ed. by D. Gubbins, E. Herrero-Bervera. – Dordrecht: Springer, 2007. – P. 715-717. – ISBN: 978-1-4020-3992-8.
12. **Soloviev, A.** Artificial intelligence in the Earth's magnetic field study and INTERMAGNET russian segment / A. Soloviev // ICSU CODATA Newsletter. – 2012. – Vol. 100. – P. 4.
13. **Soloviev, A.** Mathematical tools for geomagnetic data monitoring and the INTERMAGNET russian segment / A. Soloviev, S. Bogoutdinov, A. Gvishiani, R. Kulchinskiy, J. Zlotnicki // Data Science Journal. – 2013. – Vol. 12. – P. WDS114-WDS119. – DOI: 10.2481/dsj.WDS-019.
14. **Thomson, A.W.P.** Geomagnetic observatories: monitoring the Earth's magnetic and space weather environment / A.W.P. Thompson // Weather. – 2014. – Vol. 69, Issue 9. – P. 234-237. – DOI: 10.1002/wea.2329.
15. **Vorobev, A.V.** Web-based information system for modeling and analysis of parameters of geomagnetic field / A.V. Vorobev, G.R. Shakirova // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 59. – P. 73-82. – DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.339.

Сведения об авторах

Воробьев Андрей Владимирович, 1983 года рождения, в 2006 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Электроника и микроэлектроника», кандидат технических наук, доцент, работает доцентом факультета информатики и робототехники ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет. Область научных интересов: геоинформационные технологии, цифровая обработка сигналов. E-mail: geomagnet@list.ru.

Воробьева Гульнара Равилевна, 1983 года рождения, в 2005 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления», кандидат технических наук, доцент, работает доцентом факультета информатики и робототехники ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет. Область научных интересов: геоинформационные и веб-технологии, системы хранения и обработки информации. E-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com.

ГРНТИ: 37.15.03.

Поступила в редакцию 7 апреля 2017 г. Окончательный вариант – 12 ноября 2017 г.

GEOINFORMATION SYSTEM FOR AMPLITUDE-FREQUENCY ANALYSIS OF GEOMAGNETIC VARIATIONS AND SPACE WEATHER OBSERVATION DATA

A.V. Vorobev¹, G.R. Vorobeva¹

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Abstract

We present and describe a method to conduct correlation and amplitude-frequency analysis of the observational data of geomagnetic variations and space weather that is based on the combined use of a concept of single information space, models and methods of wavelet and Fourier analysis, and geo-information technologies. The method includes formalized elements of mathematical and methodological support for conducting amplitude-frequency and correlation analysis of the observations of geomagnetic variations and space weather and is verified by means of a prototype in-house platform-independent web-oriented geoinformation system GEOMAGNET (<https://www.geomagnet.ru>). The proposed method is verified using data obtained from the magnetic ob-

servatories of the INTERMAGNET network and space weather data from the artificial Earth satellite *ACE*. Results of the observation, automated correlation and amplitude-frequency analysis of signals that provide information on the geomagnetic field and space weather variations at specified time intervals both on the Earth's surface and in near-Earth space are discussed and evaluated.

Keywords: wavelets, information processing, geomagnetic variations, space weather, frequency filter, correlation analysis, information system.

Citation: Vorobev AV, Vorobeva GR. Geoinformation system for amplitude-frequency analysis of geomagnetic variations and space weather observation data. *Computer Optics* 2017; 41(6): 963-972. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-963-972.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR project 15-07-02731_a).

References

- [1] Gurfinkel YuI. Ischemic heart disease and solar activity [In Russian]. Moscow: "ИИК Elf-3" Publisher; 2004. ISBN: 5-88982-031-1.
- [2] Petrukovich A, ed. Solar-terrestrial connections and cosmic weather [In Russian]. In book: Zelenyi LM, Veselovskiy IO, ed. Plasma heliogeophysics. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2008. T II(Ch 8): 175-257.
- [3] Khain VE, Khalilov EN. About possible influence of solar activity on seismic and volcanic activity: long-term forecast [In Russian]. Science without borders. Transactions of the International Academy of Science H&E 2007/2008; 3.
- [4] Kharchenko MA. Correlation analysis [In Russian]. Voronezh: Voronezh state university publishing; 2008.
- [5] Gvishiani A, Lukianova R, Soloviev A, Khokhlov A. Survey of geomagnetic observations made in the northern sector of Russia and new methods for analysing them. *Surveys in Geophysics* 2014; 35(5): 1123-1154. DOI: 10.1007/s10712-014-9297-8.
- [6] Hamoudi M, Zaourar N, Mebarki R, Briquet L, Parrot M. Wavelet analysis of ionospheric disturbances. *EGU General Assembly* 2009; 11: 8523.
- [7] Dawson E, Lowndes J, Reddy P. The british geological survey's new geomagnetic data web service. *Data Science Journal* 2013; 12: WDS75-WDS80. DOI: 10.2481/dsj.WDS-010.
- [8] Kerridge D. INTERMAGNET: Worldwide near real-time geomagnetic observatory data. *ESA Space Weather Workshop* 2001: 1-4.
- [9] Love J, Chulliat A. An International Network of Magnetic Observatories. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 2013; 94(42): 373-374. DOI: 10.1002/2013EO420001.
- [10] Mukaka MM. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Med J* 2012; 24(3): 69-71.
- [11] Rasson J. Observatories, Intermagnet. In Book: Gubbins D., Herrero-Bervera E, eds. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Dordrecht: Springer; 2007: 715-717. ISBN: 978-1-4020-3992-8.
- [12] Soloviev A. Artificial intelligence in the Earth's magnetic field study and INTERMAGNET Russian Segment. *ICSU CODATA Newsletter* 2012; 100: 4.
- [13] Soloviev A, Bogoutdinov S, Gvishiani A, Kulchinskiy R, Zlotnicki J. Mathematical tools for geomagnetic data monitoring and the INTERMAGNET russian segment. *Data Science Journal* 2013; 12: WDS114-WDS119. DOI: 10.2481/dsj.WDS-019.
- [14] Thomson AWP. Geomagnetic observatories: monitoring the Earth's magnetic and space weather environment. *Weather* 2014; 69(9): 234-237. DOI: 10.1002/wea.2329.
- [15] Vorobev AV, Shakirova GR. Web-based information system for modeling and analysis of parameters of geomagnetic field. *Procedia Computer Science* 2015; 59: 73-82. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.339.

Authors' information

Andrei Vladimirovich Vorobev (b. 1983) graduated from Ufa State Aviation Technical University in 2006, majoring in Electronic and Microelectronics, PhD. Currently he works as the associate professor of Computer Science and Robotics department in Ufa State Aviation Technical University. Research interests are geoinformation technologies, digital signal processing. E-mail: geomagnet@list.ru.

Gulnara Ravilevna Vorobeva (b. 1983) graduated from Ufa State Aviation Technical University in 2005, majoring in Automated Systems of Data Processing and Control, PhD. Currently she works as the associate professor of Computer Science and Robotics department in Ufa State Aviation Technical University. Research interests are geoinformation and web technologies, systems of information storing and processing. E-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com.

Received April 7, 2017. The final version – November 12, 2017.

Дизайн: Я.Е. Тахтаров. Оформление и вёрстка: М.А. Вахе, Е.В. Семиколенных, С.В. Смагин и Я.Е. Тахтаров.
Лит. редактор и корректор Ю.Н. Литвинова. Консультант по оформлению англоязычного блока М.И. Котляр.
E-mail: ko@smr.ru, www: <http://www.computeroptics.smr.ru>

Подписано в печать 15.12.2017 г. Усл. печ. л. 21,48.

Заказ № 11/6. Тираж 217 экз. Печать офсетная. Формат 62x84 1/8.

Цена: 550 рублей / Price of 550 rubles (6+)

Редакция: Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, (443010, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151)

Соучредители: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, г. Самара, Московское шоссе, д.34),

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д.17А)

Отпечатано в типографии ООО «Предприятие «Новая техника» (443013 г. Самара, пр-кт. Карла Маркса, 24-76)