

ПРОБЛЕМЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ГЕОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА

В. А. Пархомов¹, В. Э. Чиликин¹, А. В. Дмитриев²

¹ *Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

² *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

Информация о статье

Дата поступления

8 февраля 2016 г.

Дата принятия к печати

25 февраля 2016 г.

Дата онлайн-размещения

29 апреля 2016 г.

Ключевые слова

Космическая погода;
мониторинг геомагнитный;
карта векторов;
эквивалентный
ионосферный ток;
авроральный электроджет

Финансирование

Проекты РФФИ 13-02-00819
и NSC103-2923-M-006002-
MY3 / 14-05-92002HHC
Taiwan — RFBR

Аннотация

В связи с нарастанием глобальных климатических проблем особую значимость приобретают проблемы прогнозирования космической погоды. В ряду многих задач одной из первостепенных является геомагнитная возмущенность околоземного космического пространства. В статье анализируются проблемы оперативного мониторинга геомагнитного состояния магнитосферы по данным регистрации вариаций геомагнитного поля на мировых сетях магнитных обсерваторий, включая сеть Intermagnet. Описывается способ реализации определения структуры, интенсивности и динамики эквивалентных ионосферных токов в фиксированных диапазонах широт: полярной шапке, авроральной зоне, средних и экваториальных широтах. Рассматриваются алгоритм, структура и реализация программного обеспечения для расчета карт векторов ионосферных токов по наземным наблюдениям вариаций геомагнитного поля на мировой сети магнитных обсерваторий и параметров межпланетной среды на спутниках. Предлагаемая программа выполнена на компилируемом языке программирования C# с применением платформы Microsoft .NET Framework. Для оценки положения южной границы авроральной электроструи разработана модификация авторской программы расчета векторов эквивалентных ионосферных токов.

ISSUES AND TOOLS OF THE GEOMAGNETIC MONITORING

Vladimir A. Parkhomov¹, Vitaliy E. Chilikin¹, Alexey V. Dmitriev²

¹ *Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

Article info

Received

February 8, 2016

Accepted

February 25, 2016

Available online

April 29, 2016

Keywords

Space weather; geomagnetic
monitoring; vector map;
ionospheric equivalent
current; auroral electrojet

Financing

RFBR, grant no. 13-02-00819
and the NSC of Taiwan, grant
no. NSC103-2923-M-006002-
MY3 / 14-05-2002HHC

Abstract

Due to the global climatic issues, the space weather prediction becomes particularly important, and the geomagnetic storminess in the near-Earth space is one of the key problems. This paper analyzes issues of the operational monitoring of the geomagnetic state of magnetosphere using the geomagnetic variations data from the magnetic observatories, including the INTERMAGNET network. The technique for identification of structure, intensity and dynamics of the ionospheric equivalent currents over a fixed range of latitudes (polar cap, auroral zone, midlatitudes, and equatorial latitudes) is detailed. We consider the algorithm, structure and software implementation for computing ionospheric current vector maps using the geomagnetic variations data retrieved from the global network of observatories and parameters of the interplanetary medium of satellites. The newly developed software has been implemented using the Microsoft .NET Framework based C# language. The authors' software for finding vectors of ionospheric equivalent currents has been modified to estimate the location of the southward border of the auroral electrojet.

ЗАДАЧИ ГЕОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА

Исследование влияния излучений Солнца во всем спектре частот на магнитосферу Земли и окружающее ее пространство является актуальной задачей. Актуальность указанной проблемы определяется программой «Космическая погода»¹ и обусловлена наличием существования глобальной угрозы для спутниковых и наземных средств связи, а также в связи с участвовавшим количеством аварий на электрических сетях вследствие индукционного воздействия мощных электромагнитных импульсов и токов, которые генерируются в ионосфере Земли [1].

Среди многих исторических примеров выделим 13 марта 1989 г. — когда геомагнитная буря, индекс Dst которой достиг ~ 600 нТл, вызвала масштабные сбои в энергосетях Канады и Северной Америки, проблемы радиосвязи во всем мире, сбои в работе космических аппаратов и обширные полярные сияния от северных широт до экватора. В результате этой бури канадская провинция Квебек погрузилась во тьму на 9 ч, а 6 млн жителей остались без тепла, света и связи [2].

В магнитосфере и ионосфере Земли постоянно формируются токовые системы в результате постоянного притока электромагнитной энергии рентгеновского и ультрафиолетового излучений Солнца и активного взаимодействия солнечного ветра и магнитного поля Земли. Как следствие, на поверхности Земли регистрируются различные проявления ионосферных токов: геомагнитные эффекты солнечных вспышек, бури и суббури. Геомагнитные возмущения развиваются в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли и кроме возмущений токов и магнитного поля приводят к ускорению энергичных частиц и возникновению полярных сияний [3].

СЕТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

Для мониторинга геофизической обстановки широко используются данные наземных наблюдений геомагнитного поля. К настоящему времени разработаны различные методы анализа ионосферных токовых систем по регистрируемым вариациям геомагнитного поля [4–8], которые осуществляются на специально созданных временных и постоянно функционирующих сетях обсерваторий. Среди таких обсер-

ваторий одной из главных является мировая сеть Intermagnet. В сети Intermagnet работает 106 геомагнитных обсерваторий в 43 странах мира, данные из которых оперативно собираются по единому формату IAGA 2002 и доступны для исследователей². Кроме этой сети по специальным запросам можно получить данные из сетей CARISMA³, 210 меридиан⁴, THEMIS⁵, IMAGE⁶, CDAWeb⁷.

Одна из проблем использования одно-временных наблюдений — различие типов магнитометров в мировых сетях, определение частоты опроса приборов и форматов представления данных, поэтому прежде чем принимать во внимание полученные данные, необходимо создать программное обеспечение для приведения их к одному формату, а затем разработать пакеты программ для мониторинга. Эти задачи и являются целью данной работы.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для глобального геомагнитного мониторинга используются давно известные классические методы:

1. Метод сферического гармонического анализа, основанный на решении уравнения Лапласа, в результате которого находятся сферические гармонические коэффициенты, определяющие внутреннюю и внешнюю части векторного потенциала геомагнитного поля [4]. В предположении, что токи текут в бесконечно тонком сферическом слое на высоте h_e ионосферы по найденным коэффициентам внутренней E_n^e и внешней E_n^m частей потенциала, определяют токовую функцию. Методика расчета коэффициентов и построения двумерных (2D) карт токов представлена в работе. Д. Базаржапова, М. И. Матвеева и В. М. Мишина [Там же].

2. Метод (техника) инверсии магнитограмм (ТИМ) — один из основных совре-

² International Real-time Magnetic Observatory Network. URL : <http://www.intermagnet.org/Welcome.php>.

³ Canadian Array for Realtime Investigations of Magnetic Activity. URL : <http://carisma.ca/>.

⁴ 210 MM Magnetic Field Data. URL : http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210/1-min_data/Readme.txt.

⁵ Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms. URL : <http://themis.ssl.berkeley.edu/index.shtml>.

⁶ International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects. URL : <http://www.ava.fmi.fi/image/>.

⁷ Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb). URL : http://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/.

¹ National Space Weather Program. Strategic Plan. Office of Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research FCM-P30-1995. Washington DC. 1995.

менных методов глобального мониторинга, разработанный под руководством В. М. Мишина [5; 6]. Принцип работы указанного метода такой: данные наблюдений непрерывной регистрации геомагнитных вариаций мировой сетью наземных магнетометров аппроксимируются рядами гармонических функций и служат массивом входных данных ТИМ. Далее используется основной алгоритм ТИМ, который сводится к решению двух эллиптических дифференциальных уравнений второго порядка, вытекающих из обобщенного закона Ома относительно электрического потенциала при известной модели электропроводности полярной ионосферы:

$$\operatorname{rot}_R(\hat{\Sigma}\bar{\nabla}U) = -\Delta J,$$

где J — токовая функция;

$$\bar{j}_{\parallel} \cdot \sin I = -\operatorname{Div} \bar{j} = -\operatorname{Div}(\hat{\Sigma}\bar{E}),$$

где \bar{j}_{\parallel} — плотность продольных токов.

Численное решение этих уравнений обеспечивает последовательное вычисление распределения в ионосфере электрического потенциала и плотности продольных токов при заданном пространственном распределении электрического потенциала и 2D-модели ионосферной электропроводности. ТИМ позволяет рассчитать основные электродинамические параметры ионосферы и магнитосферы: ионосферные и продольные токи, электрические поля, открытый магнитный поток в долях хвоста магнитосферы, длину хвоста, мощности джоулева нагрева ионосферы и поступающей в магнитосферу из солнечного ветра и ряд других. Данные ТИМ используются также для диагностики геоэффективных параметров солнечного ветра или прогноза космической погоды. Необходимо отметить, что реализация ТИМ требует не только больших вычислительных мощностей, но и значительных трудозатрат для подготовки данных перед проведением вычислений, поэтому указанный метод используется в российских и зарубежных научно-исследовательских институтах преимущественно для решения диагностических задач.

3. Метод сферических элементарных токовых систем (SECS) — модификация метода сферического гармонического анализа, описанная О. Амми и А. Вильяненом [7] для получения эквивалентных токовых систем по данным обсерваторий в Канаде и Гренландии. Техника определяет две элементарные токовые системы:

– бездивергентная элементарная система токов, которые текут полностью в ионосфере;

– вихревая система, чья дивергенция представляет продольные токи (FAC).

4. Метод построения карт токовых векторов — проще и менее затратен, чем СГА и ТИМ, однако уступает им в точности и количестве получаемой информации. Согласно методике построения карты [8–10] из текущих значений вариации геомагнитного поля вычиталась вариация, обусловленная S_q токами спокойного дня. Для каждой обсерватории производились вычисления по следующим формулам:

$$\Delta H = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad \text{и} \quad \delta = \operatorname{arctg} \frac{\Delta Y}{\Delta X}.$$

Значения ΔH и δ служат оценкой величины и направления эквивалентного тока, протекающего над обсерваторией. Полученные значения в виде вектора, длина которого определяется величиной ΔH под углом δ к горизонтали, наносятся на карту в географической системе координат. В работах [8; 9] выполнено сравнение карт векторов для вспышки, произошедшей 7 сентября 2007 г., полученных по программе [9] с расчетом карты токовых систем и рассчитанных методом СГА [4]. Проблема обработки данных методами СГА и ТИМ заключается в сложной предварительной подготовке данных. Простота метода построения карт токовых векторов позволяет создать удобный инструмент для быстрых расчетов и мониторинга геомагнитной обстановки.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОСИ АВРОРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДЖЕТА

Метод векторных диаграмм применяются не только для оценочного мониторинга вида токовых систем, усиливающихся в ионосфере во время мощных рентгеновских солнечных вспышек и суббурь, но и для определения положения центра тяжести аврорального электроджета. Эта оценка основана на следующих предположениях. Как описано в статье В. А. Пархомова и П. М. Климова [10], система ионосферных токов, ответственных за наблюдаемые во время суббури геомагнитные вариации, представляется в виде двухвихревой системы токов, причем в вечерне-полуночном секторе течет интенсивный западный электроджет. Формирование западной электроструи происходит на широте аврорального овала — там, где максимальна активность

полярных сияний при суббуре. Если во время суббури перемещаться на предполуночном меридиане от средних к высоким широтам и регистрировать вертикальную Z -компоненту геомагнитного поля, то отклонение компоненты меняет знак с отрицательного на положительный при переходе через максимум тока. Широта смены знака Z -компоненты и будет считаться широтой центра тяжести аврорального тока. На этой широте достигается максимального значения и величина тока, определяемая по H -компоненте. Эта закономерность может быть положена в основу методики определения центра тяжести аврорального электроджета во время суббури. С этой целью необходимо на каждой обсерватории определить невозмущенное значение Z -компоненты, а затем из текущего значения компоненты вычитать значение спокойного уровня. Полученное значение ΔZ для каждой станции наносится на карту, при этом положительным значениям соответствуют вектора с левым направлением, а отрицательным — с правым.

Существует независимый метод проверки широты положения центра авроральной электроструи по периоду сопровождающих суббури геомагнитных пульсаций $Pi2$. В работе В. А. Пархомова, В. В. Ступина, В. П. Назарец показано [11], что период пульсаций и широта максимума электроджета связаны следующим соотношением:

$$\Phi^\circ = (0,14 \pm 0,01)T + (57,78 \pm 0,16),$$

где Φ° — широта положения центра тяжести аврорального электроджета; T — средний период $Pi2$, регистрируемый на низкоширотной станции меридиана максимального проявления суббури.

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВЫХ ВЕКТОРОВ

Не смотря на успешную эксплуатацию данной программы по регистрируемым вариациям геомагнитного поля [9], в ней обнаружилось недостатки. К ним можно отнести: отсутствие возможности визуализации различных параметров солнечных излучений, солнечного ветра и потоков частиц в радиационных поясах, необходимость предварительной обработки данных и приведения их к определенному формату для отображения на графике. Кроме того, рассчитываемая в программе линия терминатора не зависела от сезона, а также в ней отсутствовала возможность корректировки выбора спокойного уровня. Программа «Вектор» имеет высокую чувствительность к

форматам входных сведений и одна ошибка в представлении данных (пробел или зашкал) приводит к останову расчета. При этом программа «Вектор» не позволяет производить обработку данных в период между сутками, поэтому и была предпринята модификация указанной программы, в которую ввели расчеты интегрального значения вектора тока в определенном диапазоне широт: в полярной шапке, авроральной зоне, средних и экваториальных широтах.

Выбор широтных поясов определялся необходимостью сравнения полученных значений с общепринятыми геомагнитными индексами Kp , PC , AE , Dst , $SYMH$, поэтому первым интервалом выбран весь диапазон широт от $+90^\circ$ до -90° . Сумма значений Hav в этом интервале широт будет определять глобальную геомагнитную возмущенность и может служить аналогом Kp (Ap) индекса магнитной активности.

Вторым широтным поясом выбраны полярные шапки северного и южного полушарий $+75^\circ$ до -90° и $(-75^\circ$ до $-90^\circ)$. Значения Hav , полученные в этом широтном поясе, могут служить аналогом индекса PC , который вычисляется по данным обсерваторий Туле и Восток.

Третьим широтным поясом выбрана авроральная зона 60° до 75° северного и южного полушарий. Интегральное значение эквивалентных ионосферных токов в этом широтном интервале будет аналогично индексу AE^8 , который вычисляется по данным обсерваторий российских и канадских магнитных обсерваторий Ловозеро, Амдерма, о. Диксон, м. Челюскин, Тикси и мыс Шмидта, Барроу, Йеллоунайф, Колледж, Форт-Черчилль, Пост-де-ла-Бален, Нарсарсуак, Лейрвокур, Абиско.

В средних широтах обоих полушарий выбран интервал 30° до 60° . Аналогов общепринятых индексов в этом широтном диапазоне нет.

Следующим широтным диапазоном выбрана приэкваториальная зона $+30^\circ$ до -30° . Можно предположить, что интегральное значение Hav в этом широтном поясе будет аналогично индексам Dst или $SYMH$, $ASYMH$. Так, индекс Dst определяется по регистрации геомагнитных вариаций и для его вычисления используются данные 4 магнитных обсерваторий Эрманус, Какиока, Гонолулу, Сан-Хуан, а также с 1992 г. дополнительная пятая станция Алибаг.

⁸ Для корректного вычисления индекса AE при расчете карты векторов необходимо добавить данные обсерваторий Амдерма, Диксон, Тикси и мыса Шмидт.

На карте векторов эти обсерватории обозначены треугольниками. Карты строятся для каждого минутного интервала в заданном временном сегменте. По оси времени перемещается движок, обозначающий расчет в данной минуте (помечен вертикальной линией). Кроме того, в программе введены функции визуализации различных параметров околоземной среды и солнечного ветра: потоки рентгеновского излучения в двух диапазонах длин волн $0,5-4,0 \text{ \AA}$ и $1,0-8,0 \text{ \AA}$; параметры солнечного ветра V, N, P и межпланетного магнитного поля B, B_x, B_y, B_z , а также потоки заряженных частиц (электроны и протоны) в радиационных поясах Земли.

Выбор шкалы параметра и диапазон графика визуализации задается оператором через интерфейс. Для модифицированной программы, как и в работе В. А. Пархомова и П. М. Климова [10], был выбран компилируемый язык программирования C# с применением платформы Microsoft .NET Framework. Язык является объектно-ориентированным и имеет множество готовых библиотек для визуализации графиков различной сложности. Недостатком использования указанной платформы может являться отсутствие кроссплатформенности, поэтому программное обеспечение, созданное с применением Microsoft .NET Framework, работает только под управлением операционных систем Microsoft Windows. Однако

компания Microsoft опубликовала исходные коды данной платформы в открытом доступе⁹, что поможет в скором будущем совместить ее с другими операционными системами. Для хранения обработанных данных и вычислений используется встраиваемая реляционная база данных SQLite, которая не использует клиент-серверную парадигму, а представляет собой библиотеку, komponующуюся с основной программой. Применение базы данных также позволило отказаться от реализации функционала выборки необходимых для построения векторной карты данных, так как данный функционал уже реализован в SQLite.

Программа выполнена в виде интерфейса и подключаемой статической библиотеки, в которой производятся все необходимые операции, имеет минимальные системные требования и зависит только от операционной системы (рис. 1). Такой подход позволит применять созданную библиотеку для общего использования в других программах.

⁹ Microsoft takes .NET open source and cross-platform, adds new development capabilities with Visual Studio 2015, .NET 2015 and Visual Studio Online. URL : <http://news.microsoft.com/2014/11/12/microsoft-takes-net-open-source-and-cross-platform-adds-new-development-capabilities-with-visual-studio-2015-net-2015-and-visual-studio-online/>.



Рис. 1. Блок-схема структуры программы расчета векторов эквивалентных ионосферных токов

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОТОКОВ
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И КАРТА
ВЕКТОРОВ ТОКОВОЙ СИСТЕМЫ SFE
(SOLAR FLARE EFFECT)**

Рассмотрим примеры использования программы для анализа магнитосферных возмущений, вызванных различными источниками. Для анализа сначала возьмем эффект солнечной вспышки, причиной которого является резкое возрастание ионизации ионосферы рентгеновским излучением вспышки.

На рис. 2 представлен пример применения программы для анализа эффекта SFE, вызванного рентгеновской вспышкой балла

$X = 9.2$ 07.09.2005. Здесь показаны вариации потока рентгеновского излучения Солнца в двух частотных диапазонах (рис. 2 а), карта векторов эквивалентных токов (рис. 2 б) и средняя напряженность магнитного поля, создаваемого токами в выбранных широтных диапазонах (рис. 2 в). На карте выделяются два вихря токов (см. рис. 2 б, эллипсы): мощный вихрь с фокусом на широте $\sim 28^\circ$ и в три раза меньший по мощности вихрь в южном полушарии с фокусом на широте $\sim 45^\circ$. Направление токов хорошо определяется по векторной диаграмме и указано стрелками. Видны особенности в распределении токов

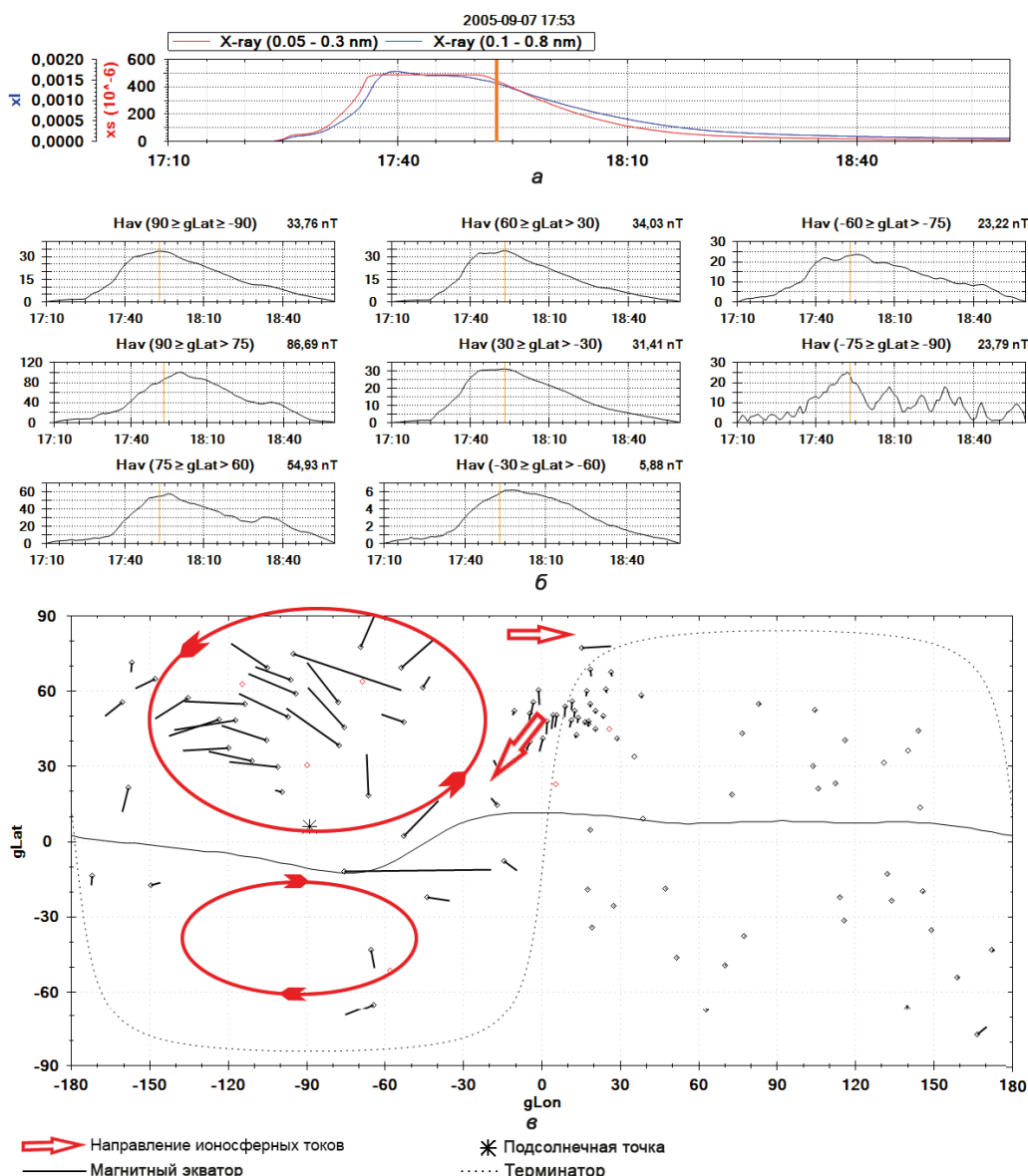


Рис. 2. Карта эквивалентных токов для SFE от 7 сентября 2005 г., построенная по данным сети Intermagnet с помощью программы:
а — вариации потока рентгеновского излучения, зарегистрированные на спутнике GOES-9 во время вспышки балла $X = 9,2$ в двух частотных диапазонах $0,5-4,0 \text{ \AA}$ и $1,0-8,0 \text{ \AA}$;
б — интегральное распределение средней напряженности магнитного поля, вызванного токами в выбранных широтных поясах;
в — карта векторов тока, вычисленных по геомагнитным наземным наблюдениям

на вечернем терминаторе. На широте $\sim 70^\circ$ интенсифицировался ток восточного направления, а на сети станций IMAGE усилились токи юго-западного направления, которые текут навстречу току в токовом вихре.

Карта эквивалентных токов того же дня, полученная методом СГА для интервала максимального развития тока (рис. 3), соответствует векторной диаграмме (см. рис. 2 б). За исключением некоторых деталей, на рис. 2–3 можно видеть неплохое соответствие между токовыми системами, полученными методом построения карт токовых векторов и методом сферического гармонического анализа.

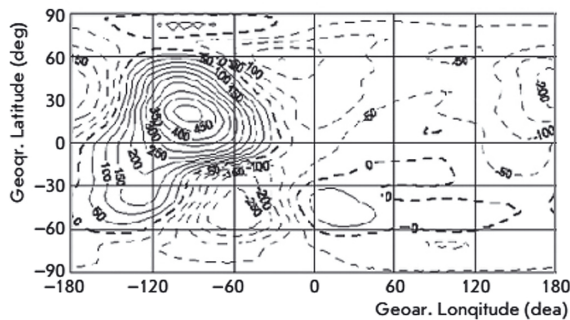


Рис. 3. Карта эквивалентных токов, построенная с использованием метода сферического гармонического анализа, для вспышки 7 сентября 2005 г.

Источник: [9]

Выполним еще одно сравнение полученной карты векторов (см. рис. 2) с результатами расчета эквивалентных ионосферных

токов по программе «Quicklook plots for 2D Equivalent Currents», доступной на сайте IMAGE и MIRACLE¹⁰. Как уже отмечалось, на рис. 2 видно возрастание восточного тока на вечернем терминаторе на широте $\sim 70^\circ$ (стрелка, направленная на восток) и незначительное усиление западного тока на терминаторе на широтах $40\text{--}60^\circ$ (стрелка, направленная на северо-запад). Усиление токов в этом регионе хорошо иллюстрируется данными, приведенными на рис. 4: в 18:00 наблюдается максимум восточного тока на широтах $75\text{--}76^\circ$ (см. рис. 2 а, стрелки), а южнее наблюдается усиление западного тока (см. рис. 2 б, тонкая стрелка). Таким образом, приведенные результаты расчетов усиления эквивалентных ионосферных токов во время солнечной вспышки дополняют друг друга и позволяют получить более полную информацию для целей мониторинга состояния околоземной среды.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И РАСЧЕТ ТОКОВЫХ ВЕКТОРОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДИАМАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МАГНИТОСФЕРОЙ

Диаманитные структуры составляют основу «медленного» квазистационарного солнечного ветра на орбите Земли, источ-

¹⁰ Magnetometers — Ionospheric Radars — Allsky Cameras Large Experiment. URL : http://www.space.fmi.fi/MIRACLE/iono_2D.php.

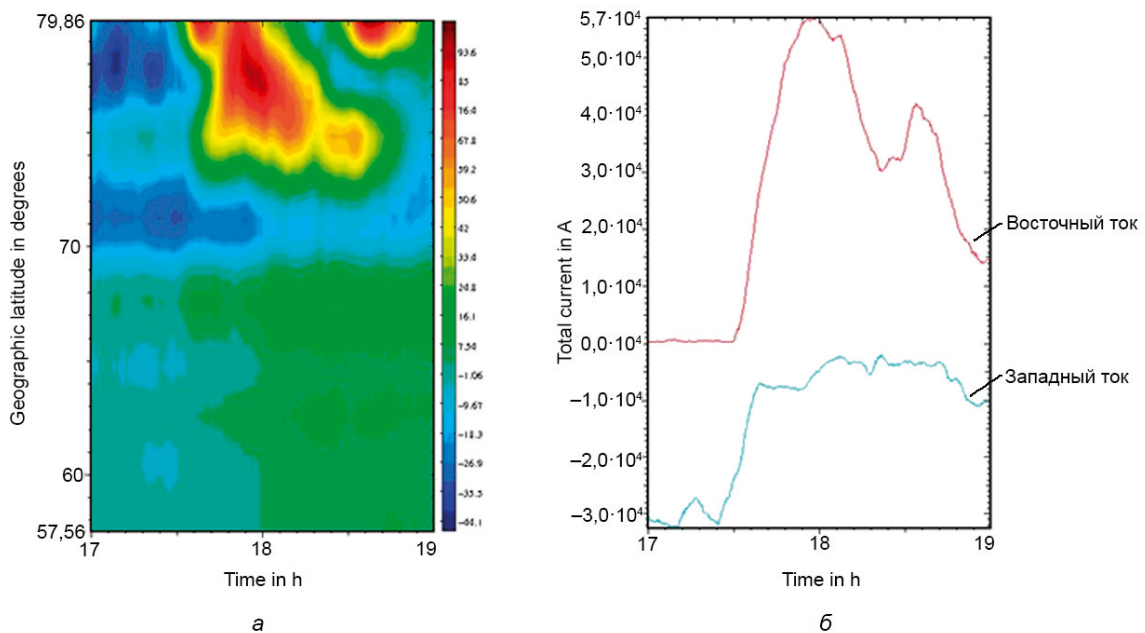


Рис. 4. Расчет ионосферных эквивалентных токов для вспышки 07.09.2005 по данным сети магнитометров IMAGE

никами которого на Солнце являются пояса или цепочки стримеров (псевдостримеры). Эти структуры, фактически, представляют собой магнитные трубки (в общем случае, магнитные жгуты) с плазмой. Такие трубки диамагнитны, т. е. на их поверхности течет диамагнитный ток, уменьшающий магнитное поле внутри трубки и увеличивающий его вне нее. Трубки сохраняют свой угловой размер на пути движения от Солнца до Земли, т. е. они являются квазистатическими на протяжении всего этого пути. В статье [12] было показано, что такие структуры вызывают в магнитосфере Земли геомагнитные возмущения, подобные суббурям, но начинаются они на дневной стороне. Диамагнитные структуры определяются по значению коэффициента корреляции между модулем ММП и концентрацией солнечного ветра. Главным признаком таких структур выступает отрицательный коэффициент корреляции, близкий по значению к -1 .

Карта токовых векторов является еще одним подтверждением отличия глобально-

го геомагнитного возмущения от суббури (рис. 5). В отличие от классической двухвальной системы токов суббури [13], в рассматриваемом случае в ионосфере западного и восточного полушарий течет ток восточного направления.

Предлагаемый инструмент позволяет получать и оценочные индексы геомагнитной активности, подобные традиционным индексам (рис. 6).

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И РАСЧЕТ ТОКОВЫХ ВЕКТОРОВ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНОГО НАЧАЛА МАГНИТНОЙ БУРИ (SSC)

Рассмотрим последовательное развитие системы ионосферных токов на примере построенных карт токовых векторов для случая взаимодействия межпланетной ударной волны с магнитосферой 17 марта 2015 г. для трех последовательных моментов: за одну минуту до внезапного начала SSC*, в момент внезапного начала

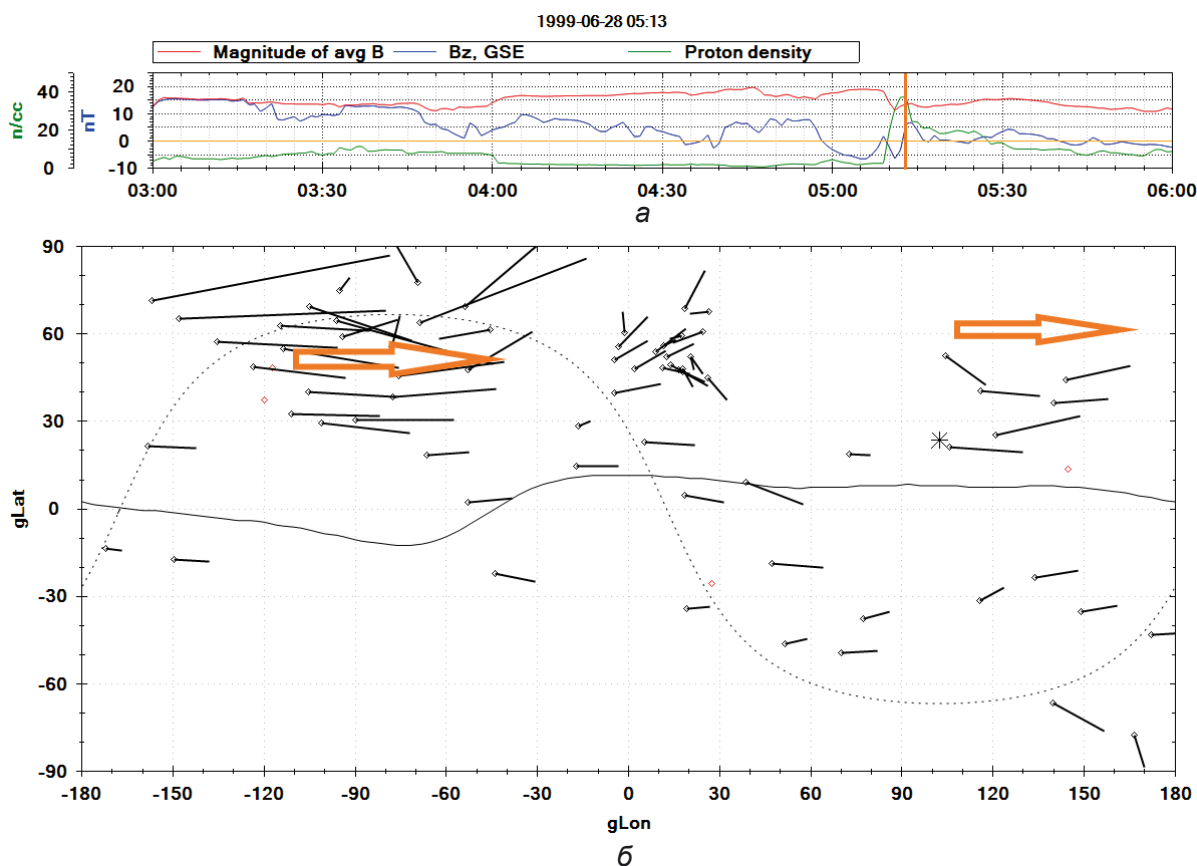


Рис. 5. Карта векторов эквивалентных ионосферных токов геомагнитного эффекта взаимодействия магнитосферы с диамагнитной структурой солнечного ветра 28 июня 1999 г. с 03 до 06 UT:

а — вариации концентрации солнечного ветра N , модуля напряженности B и вертикальной компоненты B_z межпланетного магнитного поля; б — карта векторов

и в следующую минуту после (рис. 7). До начала взаимодействия можно проследить слабую магнитную активность на высоких широтах неосвещенного полушария (см. рис. 7 а). В первую минуту взаимодействия (см. рис. 7 б) видно изменение состояния токовой системы по причине сжатия магнитосферы. В авроральной зоне (на широтах 65° – 75°) происходит усиление токов западного направления (обозначено *PR1*). Это возрастание тока связано с развитием токовой системы предварительного обратного импульса. Наибольшее возрастание токов наблюдается на вечернем и утреннем терминаторах. При последующем сжатии усиливается вихрь токовой системы DP-2 на

ночной стороне, усиливаются токи восточного направления на дневной стороне, но особенно сильно происходит возрастание тока на утреннем терминаторе (обозначено жирной стрелкой северо-восточного направления). Для сравнения приведем расчет ионосферных эквивалентных токов для внезапного начала бури по данным сети магнитометров IMAGE, подобно тому, как это было сделано на сайте IMAGE и MIRACLE для сравнения токов вспышки. При сравнении результатов, представленных на рис. 7 б и 7 г, видно неплохое соответствие токов на карте векторов по величине и направлению токам, рассчитанным по данным меридиональной сети магнитометров IMAGE.

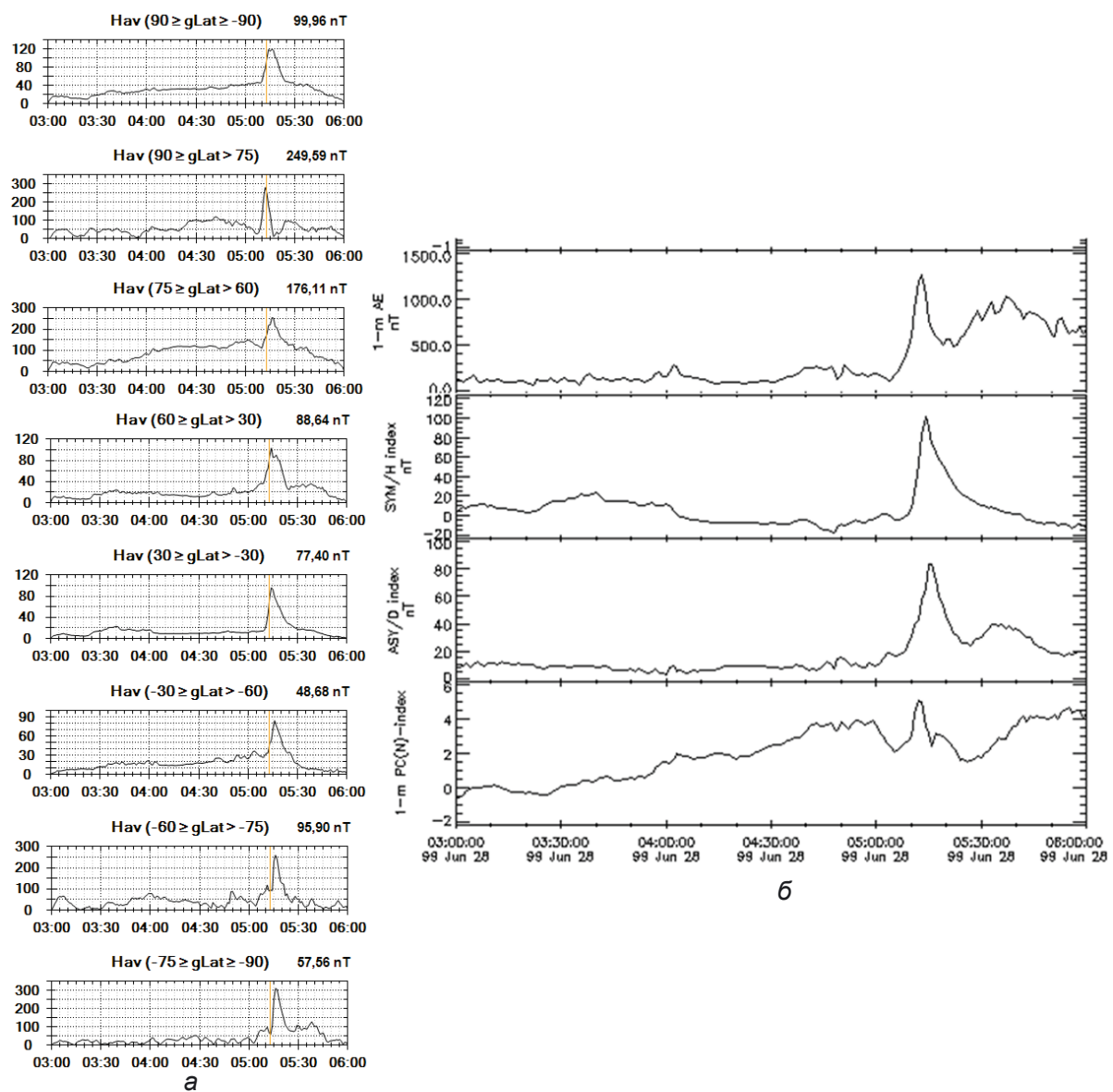


Рис. 6. Сравнение *Hav*, вычисленных по широтным разрезам с индексами AE, ASYH, ASYD, PC(N), для события взаимодействия магнитосферы с диамагнитной структурой:

а — вариации *Hav* средней напряженности геомагнитного поля, создаваемые ионосферными токами, вычисленные по широтным разрезам с 03 до 06 UT; б — вариации индексов AE, ASYH, ASYD, PC(N) в том же временном интервале по данным CDAWeb

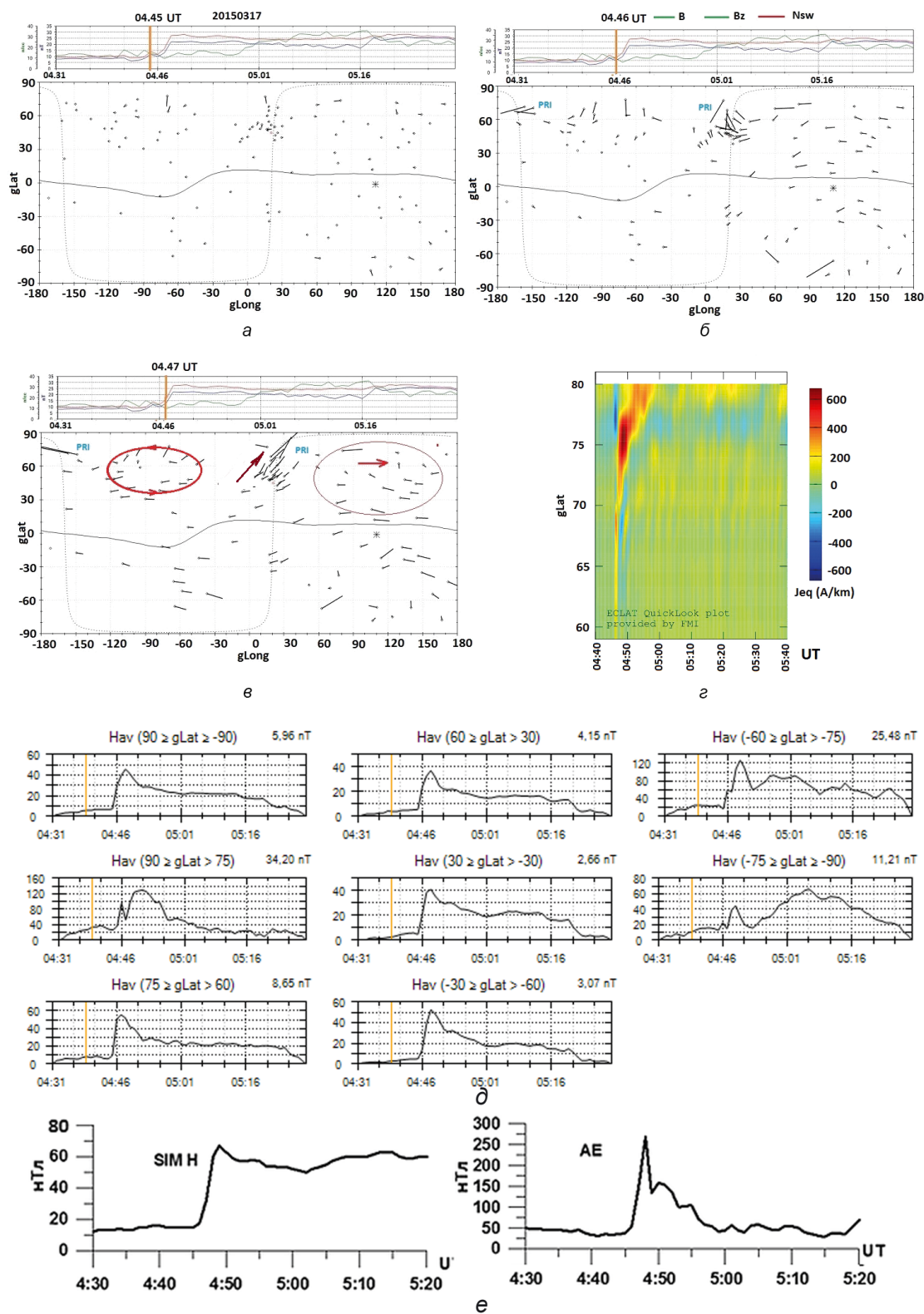


Рис. 7. Карты токовых векторов в последовательные моменты развития внезапного начала магнитной бури 17 марта 2015 г.:

- а — до начала отклика магнитосферы на приход межпланетной ударной волны в 04:45;
- б — реакция магнитосферы на контакт с межпланетной ударной волной;
- в — отклик магнитосферы на сжатие за счет роста концентрации (давления) солнечного ветра; г — расчет ионосферных эквивалентных токов для внезапного начала бури по данным сети магнитометров IMAGE; д — вариации H_{av} средней напряженности геомагнитного поля, создаваемые ионосферными токами, вычисленные по широтным разрезам с 04:30 до 05:30 UT; е — вариации индексов AE, SIM H по данным CDAWeb

Таким образом, использование простой методики расчета токовых векторов, построения карт векторов и суммирования рассчитанных токов в выбранных широтных интервалах позволяет проводить оперативный мониторинг геомагнитных возмущений различного вида, используя в одном про-

граммном продукте данные наблюдений на космических аппаратах и наземные геомагнитные наблюдения. По нашему мнению, предлагаемая программа может быть использована для оперативного мониторинга ионосферных токовых систем во время геомагнитных возмущений различной природы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kappenman John G. Comment on «Space weather and the electricity market: An initial assessment» by Kevin F. Forbes and O. C. St. Cyr / John G. Kappenman // *Space Weather*. — 2006. — Vol. 4, iss. 9. — DOI : 10.1029/2005SW000168.
2. Odenwald S. The Day the Sun Brought Darkness [Electronic resource] / S. Odenwald. — Mode of access : http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html.
3. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы : пер. с англ. / А. Нишида ; под ред. Я. И. Фельдштейна. — М. : Мир, 1980. — 306 с.
4. Базаржапов А. Д. Геомагнитные вариации и бури / А. Д. Базаржапов, М. И. Матвеев, В. М. Мишин. — Новосибирск : Наука, 1979. — 246 с.
5. Мишин В. М. Эффекты суточного вращения Земли на планетарные ионосферные системы электрических токов / В. М. Мишин, А. Д. Базаржапов // *Исследования по геомагнетизму аэронауки и физике Солнца*. — Иркутск : Ин-т солнечно-земной физики Сиб. отд-ния РАН, 1969. — Вып. 5. — С. 3–27.
6. Ширапов Д. Ш. Моделирование глобальных электродинамических процессов в геомагнитосфере / Д. Ш. Ширапов, В. М. Мишин. — Улан-Удэ : Изд-во Вост.-Сиб. гос. ун-та технологий и управления, 2009. — 213 с.
7. Amm O. Ionospheric disturbance magnetic field continuation from the ground to the ionosphere using spherical elementary currents systems / O. Amm, A. Viljanen // *Earth, Planets and Space*. — 1999. — Vol. 51, iss. 6. — P. 431–440. — DOI : 10.1186/BF03352247.
8. Sabben D. van. Solar Flare Effects and Simultaneous Magnetic Daily Variation / D. van Sabben // *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*. — 1968. — Vol. 30. — P. 1641–1648.
9. Parkhomov V. A. Spatial Features of Current Systems of SFE Flares Accompanied by Gamma Radiation / V. A. Parkhomov, A. V. Dmitriev, A. D. Bazargapov // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2010. — Vol. 50, № 8 (Spec. iss. 2). — P. 1003–1014.
10. Пархомов В. А. Программа «Вектор» для анализа ионосферных токовых систем во время солнечных вспышек / В. А. Пархомов, П. М. Климов // *Известия Иркутской государственной экономической академии*. — 2013. — № 4 (90). — С. 104–108.
11. Пархомов В. А. Диагностика аврорального электроджета / В. А. Пархомов, В. В. Ступин, В. П. Назарец // *Геомагнетизм и аэронаука*. — 1990. — Т. 29, № 2. — С. 318–319.
12. Резкие изменения концентрации в спорадическом солнечном ветре и их воздействие на магнитосферу земли / В. А. Пархомов, Н. Л. Бородкова, В. Г. Еселевич, М. В. Еселевич // *Космические исследования*. — 2015. — Т. 53, № 6. — С. 449–460. — DOI : 10.7868/S002342061505009X.
13. Акасофу С. И. Полярные и магнитосферные суббури / С. И. Акасофу. — М. : Мир, 1971. — 320 с.

REFERENCES

1. Kappenman John G. Comment on «Space weather and the electricity market: An initial assessment» by Kevin F. Forbes and O. C. St. Cyr. *Space Weather*, 2006, vol. 4, iss. 9. DOI:10.1029/2005SW000168.
2. Odenwald S. *The Day the Sun Brought Darkness*. Available at: http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html.
3. Nishida A. *Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere*. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag, 1978. 263 p. (Russ. ed.: Nishida A.; Fel'dshtein Ya. I. (ed.). *Geomagnitnyi diagnost magnetosfery*. Moscow, Mir Publ., 1980. 306 p.).
4. Bazargapov A. D., Matveev M. I., Mishin V. M. *Geomagnitnye variatsii i burii* [Geomagnetic variations and storms]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 246 p.
5. Mishin V. M., Bazargapov A. D. Effects of the daily earth's rotation on planetary ionospheric systems of the electric Sq-currents. *Issledovaniya po geomagnetizmu aeronomii i fizike Solntsa* [The study of geomagnetic aeronomy and solar physics]. Irkutsk, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences Publ., 1969, iss. 5, pp. 3–27. (In Russian).
6. Shirapov D. Sh., Mishin V. M. *Modelirovanie global'nykh elektrodinamicheskikh protsessov v geomagnitosfere* [Modeling of the global electrodynamic processes in]. Ulan-Ude, East Siberia State University of Technology and Management Publ., 2009. 213 p.
7. Amm O., Viljanen A. Ionospheric disturbance magnetic field continuation from the ground to the ionosphere using spherical elementary currents systems. *Earth, Planets and Space*, 1999, vol. 51, iss. 6, pp. 431–440. DOI: 10.1186/BF03352247.
8. Sabben D. van. Solar Flare Effects and Simultaneous Magnetic Daily Variation. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, 1968, vol. 30, pp. 1641–1648.
9. Parkhomov V. A., Dmitriev A. V., Bazargapov A. D. Spatial Features of Current Systems of SFE Flares Accompanied by Gamma Radiation. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2010, vol. 50, no. 8 (special iss. 2), pp. 1003–1014.

10. Parkhomov V. A., Klimov P. M. The computer program «Vector» for analysis by ionospheric current systems during the solar flares. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii = Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy*, 2013, no. 4 (90), pp. 104–108. (In Russian).

11. Parkhomov V. A., Stupin V. V., Nazarets V. P. Diagnostics of the auroral electrojet. *Geomagnetizm i aeronomiya = Geomagnetism and Aeronomy*, 1990, vol. 29, no. 2, pp. 318–319. (In Russian).

12. Parkhomov V. A., Borodkova N. L., Eselevich V. G., Eselevich M. V. Abrupt changes of density in sporadic solar wind and their effect on Earth magnetosphere. *Kosmicheskie issledovaniya = Cosmic Research*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 449–460. DOI: 10.7868/S002342061505009X. (In Russian).

13. Akasofu S. I. *Polyarnye i magnitofernye subburi* [Polar and magnetospheric substorms]. Moscow, Mir Publ., 1971. 320 p.

Информация об авторах

Пархомов Владимир Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информатики и кибернетики, Байкальский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: parhomov@bgu.ru.

Чиликин Виталий Эдуардович — аспирант, кафедра информатики и кибернетики, Байкальский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: chilikinve@ya.ru.

Дмитриев Алексей Владимирович — ведущий научный сотрудник, Институт ядерной физики им. В. Д. Скобельцина, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: dalex@jupiter.ss.ncu.edu.tw.

Библиографическое описание статьи

Пархомов В. А. Проблемы и инструменты геомагнитного мониторинга / В. А. Пархомов, В. Э. Чиликин, А. В. Дмитриев // Известия Иркутской государственной экономической академии. — 2016. — Т. 26, № 2. — С. 300–311. — DOI: 10.17150/1993-3541.2016.26(2).300-311.

Authors

Vladimir A. Parkhomov — Doctor habil. (Physical and Mathematical Sciences), Professor, Department of Computer Science and Cybernetics, Baikal State University, 11 Lenin St., 664003, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: parhomov@bgu.ru.

Vitaliy E. Chilikin — PhD Student, Department of Computer Science and Cybernetics, Baikal State University, 11 Lenin St., 664003, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: chilikinve@ya.ru.

Alexey V. Dmitriev — Senior researcher, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: dalex@jupiter.ss.ncu.edu.tw.

Reference to article

Parkhomov V. A., Chilikin V. E., Dmitriev A. V. Issues and tools of the geomagnetic monitoring. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii = Bulletin of Irkutsk State Economics Academy*, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 300–311. DOI: 10.17150/1993-3541.2016.26(2).300-311. (In Russian).