

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

---

УДК 004.67  
ББК 32.973-018.2

**В. А. ПАРХОМОВ**  
*доктор физико-математических наук, профессор,  
Байкальский государственный университет экономики и права*

**П. М. КЛИМОВ**  
*Байкальский государственный университет экономики и права*

## ПРОГРАММА «ВЕКТОР» ДЛЯ АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВЫХ СИСТЕМ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

---

С ростом применения спутниковой связи, а также различного рода навигаторов возникла необходимость в создании программного комплекса для решения практических задач расчета возрастания ионосферных токов, вызванных разнообразными причинами. На примере обработки вариаций геомагнитного поля мировой сети магнитных обсерваторий «Intermagnet» во время мощной солнечной вспышки 7 сентября 2005 г. представлен разработанный авторами программный комплекс для решения практических задач расчета возрастания ионосферных токов, вызванных различными причинами. Данная программа реализована на объектно-ориентированном языке программирования C#. В статье приводятся описание и сравнение средств реализации, математическое обеспечение алгоритма расчета, структурные и функциональные требования, результаты и алгоритм работы, а также системные требования компьютерной программы для вычисления и построения карт векторов ионосферных токов, определяемых по наземным наблюдениям вариаций геомагнитного поля. Сравнение глобальной карты токовых векторов, построенной с помощью созданной программы, с картой распределения токов, вычисленных методом сферического гармонического анализа, показало их неплохое соответствие.

*Ключевые слова:* вариации геомагнитного поля; вектор ионосферного тока; токовая система эффекта солнечной вспышки.

---

**V. A. PARKHOMOV**  
*Doctor habil. (Physical and Mathematical Sciences), Professor,  
Baikal State University of Economics and Law*

**P. M. KLIMOV**  
*Baikal State University of Economics and Law*

## THE COMPUTER PROGRAM «VECTOR» FOR ANALYSIS BY IONOSPHERIC CURRENT SYSTEMS DURING THE SOLAR FLARES

---

The article presents a description of the domain and task of the software for the solution of practical problems of calculation of increase of ionospheric currents caused by various reasons. The description and comparison of means of implementation, the software algorithm for calculating the structural and functional requirements, the results of implementation of the algorithm and system requirements of a computer program for calculating and plotting of maps vectors of ionospheric currents determined by ground-based observations of variations of the geomagnetic field. The program is implemented in an object oriented programming language C#. The implemented software system used to handle variations in the geomagnetic field on the global network of magnetic observatories «Intermagnet» during a powerful solar flare 07.09.2005, the comparison of the global map of current vectors constructed making use of the program, with a map of the current distribution calculated using a spherical harmonic analysis showed their good match.

*Keywords:* computer program; variations of geomagnetic field; vector of the ionospheric current; current system SFE.

---

В последние годы одной из актуальных тем в исследованиях околоземного космического пространства является проблема космической погоды. Актуальность проблемы определяется тем, что с ростом применения спутниковой связи, различного рода навигаторов важно знать состояние ионосферы Земли — слоя заряженных частиц на высотах 90–250 км. Этот слой определяет особенности распространения радиоволн различного диапазона частот. Состояние ионосферы зависит от мощности и характера солнечного электромагнитного излучения. Солнечные вспышки являются источником резкого возрастания электромагнитного излучения, что приводит к мощным возмущениям ионосферы земли и развитию ионосферных токов (до  $\sim 10^6$  А) [4]. В свою очередь, резкие изменения токов вызывают вариации геомагнитного поля Земли. К настоящему времени разработаны методы анализа ионосферных токовых систем по вариациям геомагнитного поля, регистрируемых на специально созданной мировой сети магнитометров. Эта сеть получила название Intermagnet. Данные, размещаемые в сети по единому формату IAGA 2002, доступны для всех исследователей<sup>1</sup>.

Основной проблемой при решении практических задач становится отсутствие свободного программного обеспечения для расчета токов. Кроме того, возникают и специальные задачи, потому что каждый эксперимент уникален, поэтому зачастую для определенного эксперимента необходимо разрабатывать новую программу. Следовательно, применение объектно-ориентированного подхода очевидно, так как обеспечивает программе обработки данных большую возможность для расширения круга решаемых задач.

Для изучения пространственных особенностей вариаций геомагнитного поля эффектов солнечной вспышки (SFE), вызываемых ионосферными токами, в практических исследованиях используются следующие методы:

1. Метод сферического гармонического анализа применяется для построения

карты эквивалентных ионосферных токов, основанный на решении уравнения Лапласа

$$V_e(r, \theta, \lambda) + V_i(r, \theta, \lambda) = \\ = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{r_e}{R} \right)^n (E_n^m \cos m\lambda + e_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos\theta) + \\ + R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r_i} \right)^{n+1} (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos\theta),$$

где  $E_n^m, e_n^m, I_n^m, i_n^m$  — сферические гармонические коэффициенты, которые определяют внутреннюю и внешнюю части потенциала, обозначенные в уравнении символами  $i$  или  $e$ .

Полагая, что токи текут в бесконечно тонком сферическом слое на высоте  $h_e$  ионосферы, по коэффициентам  $E_n^m$  и  $e_n^m$  можно определить токовую функцию

$$J_e(\theta, \lambda) = -\frac{10R}{4\pi} \times \\ \times \sum_n \sum_m \frac{2n+1}{n+1} \left( \frac{r_e}{R} \right)^n (E_n^m \cos m\lambda + e_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos\theta),$$

где  $r_e = R + h_e$ .

Методика расчета коэффициентов и построения двумерных карт токов представлена в [2]. Метод сферического гармонического анализа более точен, чем метод построения карт токовых векторов, однако требует большой подготовительной работы и специального программного обеспечения, созданного в Институте солнечно-земной физики СО РАН [Там же]. Далее для сравнения расчетов, выполненных по разрабатываемой авторами программе, возьмем готовые расчеты для вспышки 7 сентября 2005 г. [7].

2. Метод построения карт токовых векторов позволяет создать удобный и технологический инструмент для быстрых расчетов и мониторинга, однако уступает в точности методу сферического гармонического анализа. Согласно методике, описанной в [4], для построения карты векторов тока из текущей вариации геомагнитного поля вычиталась вариация, обусловленная  $Sq$  токами спокойного дня. Для каждой обсерватории находились величины

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

<sup>1</sup> International Real-time Magnetic Observatory Network. URL : <http://www.intermagnet.org/Welcome.php>.

Вычисленные значения  $\Delta H$  и  $\delta$  служили оценкой величины и направления эквивалентного тока, протекающего над обсерваторией, которые наносились на карту в географической системе координат.

Для решения поставленной задачи выполнен анализ языков программирования и выбран наиболее подходящий, по нашему мнению, — C# [1; 3]. Это компилируемый язык программирования, имеющий множество средств для визуального представления и создания графиков различной сложности. Основными достоинствами данного языка являются наличие стандартных библиотек для работы с графикой, простота контроля за памятью, реализация объектно-ориентированной парадигмы программирования. Основными минусами данного языка является низкая скорость работы, недостаточный контроль за памятью, отсутствие инструментов объектного подхода.

Программа состоит из 2 основных пакетов и 6 дополнительных. Дополнительные модули предназначены для решения вспомогательных задач, таких как выборка станций определенной широты и долготы. На рис. 1 показана структурная схема модулей программы, при этом основные модули выделены жирной рамкой. Подобная структура обеспечивает программе хорошие возможности к последующему расширению. Взаимодействие между модулями может быть прямым

(сплошная линия на рисунке) и непосредственно через файловую систему (пунктирная линия), которая служит иерархической базой данных для данной программы.

Тестирование показало, что программа корректно работает на минимальных системных требованиях и независима от программного обеспечения (статическая компоновка) [5]. Как и любое современное программное обеспечение, данная программа снабжена соответствующей документацией, включающей справочную информацию о программе, руководство пользователя.

Сравним карты ионосферных токов для мощной солнечной вспышки, наблюдаемой 7 сентября 2005 г., рассчитанных двумя способами: методом сферического анализа и методом построения карты векторов. Вариации вспышечного потока рентгеновского излучения исследовались в диапазоне волн длиной 0,5–4 Å и 1–8 Å (рис. 2), где среднее значение магнитного поля, вычисленное по данным мировой сети Intermagnet  $H_{av} = 36,6$  nT. На картах эквивалентных токов, созданных по данным Intermagnet  $I$  с помощью программы «Вектор» в максимуме эффекта солнечной вспышки (SFE) в 17:53 UT (рис. 3а) и полученной с использованием метода сферического гармонического анализа в тот же момент времени (рис. 3б), четко прослеживается географическое совпадение фокусов токовой системы (ток между изолиниями 50 кА).

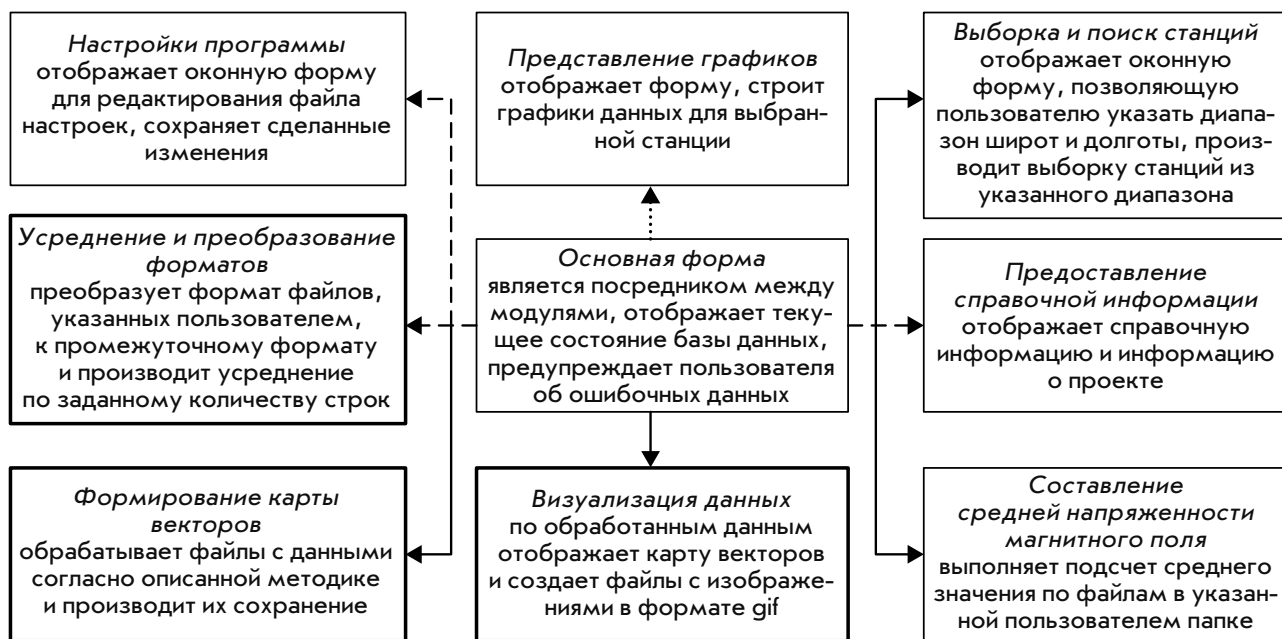


Рис. 1. Блок-схема структуры программы «Вектор»



Рис. 2. Вариации вспяшечного потока рентгеновского излучения с длинами волн 0,5–4 Å ( $x_1$ ) и 1–8 Å ( $x_s$ )

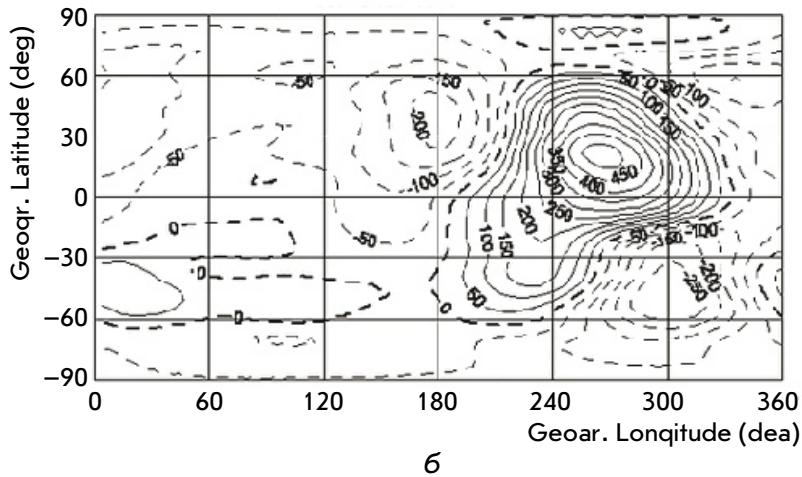
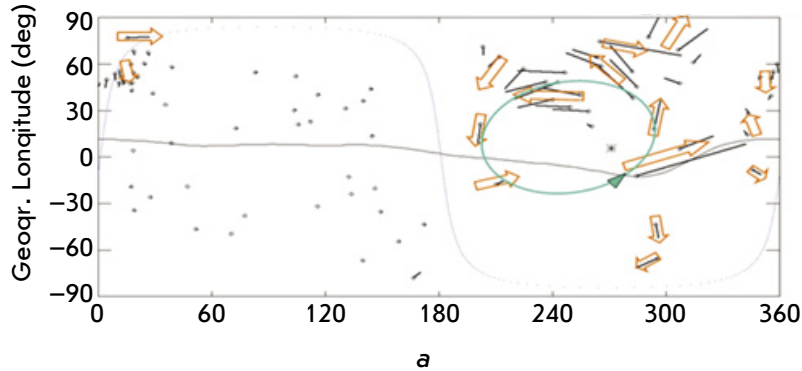


Рис. 3. Карты эквивалентных токов, построенные по данным *Intermagnet* с помощью программы «Вектор» в максимуме эффекта солнечной вспышки в 17:53 UT (а) и полученные метода сферического гармонического анализа в тот же момент времени (б)

Представленные материалы показывают неплохое соответствие между токовыми системами, полученными с помощью программ, реализующих разные алгоритмы вычисления ионосферных токов [7; 8]. Поэтому предлагаемая программа

вычисления векторов ионосферных токов по наземным наблюдениям вариаций геомагнитного поля может использоваться для оперативного мониторинга токовых систем ионосферы во время ионосферных возмущений.

#### Список использованной литературы

1. Аммерал Л. Принципы программирования в машинной графике / Л. Аммерал ; пер. с англ. В. А. Львова. — М. : Сол Систем, 1992. — 224 с.
2. Базаржапов А. Д. Геомагнитные вариации и бури / А. Д. Базаржапов, М. И. Матвеев, В. М. Мишин. — Новосибирск : Наука, 1979. — 246 с.
3. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений : пер. с англ. / Г. Буч. — 2-е изд. — М. : Бинوم ; СПб. : Невский диалект, 2000. — 560 с.
4. Митра А. П. Ионосферные эффекты солнечных вспышек / А. П. Митра. — М. : Мир, 1977. — 278 с.

5. Тамре Л. Введение в тестирование программного обеспечения : пер. с англ. / Л. Тамре. — М. : Вильямс, 2003. — 368 с.
6. Dmitriev A. V. Geomagnetic signatures of sudden ionospheric disturbances during extreme solar radiation events / A. V. Dmitriev, H.-C. Yeh // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 2008. — Vol. 70, no. 15. — P. 1971–1984.
7. 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, no. 8 (Special Iss. 2). — P. 1003–1014.
8. Parkhomov V. A. Spatial Features of SFE Current Systems and Geomagnetic Pulsations PSFE Related to Gamma Radiation from Solar Flares / V. A. Parkhomov, A. V. Dmitriev, P. M. Klimov // *Gamma Rays. Technology, Applications and Health Implications.* — New York : Nova Publisher, 2013. — 345 p.

### References

1. Ammeraal L. *Programming principles in computer graphics.* John Wiley & Sons, 1986. 165 p. (Russ. ed.: Ammeraal L. *Printsipy programmirovaniya v mashinnoi grafike.* Moscow, Sol Sistem Publ., 1992. 224 p.)
2. Bazargapov A. D., Matveev M. I., Mishin V. M. *Geomagnitnye variatsii i buri* [Geomagnetic variations and storms]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 246 p.
3. Booch G. *Object-oriented analysis and design with application.* 2<sup>nd</sup> ed. Addison-Wesley Longman, 1994. 608 p. (Russ. ed.: Buch G. *Obektno-orientirovanniy analiz i proektirovanie s primerami prilozhenii.* 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Binom Publ.; Saint-Petersburg, Nevskii dialekt Publ., 2000. 560 p.)
4. Mitra A. P. *Ionospheric effects of solar flares.* Boston; Dordrecht, Holland: D. Reidel Publ., 1974. 294 p. (Russ. ed.: Mitra A. P. *Ionosfernye efekty solnechnykh vspyshek.* Moscow, Mir Publ., 1977. 278 p.)
5. Tamres L. *Introducing software testing.* Addison-Wesley, 2002. 304 p. (Russ. ed.: Tamre L. *Vvedenie v testirovanie programmnogo obespecheniya.* Moscow, Vilyams Publ., 2003. 368 p.)
6. Dmitriev A. V., Yeh H.-C. Geomagnetic signatures of sudden ionospheric disturbances during extreme solar radiation events. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2008, vol. 70, no. 15, pp. 1971–1984.
7. 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.
8. Parkhomov V. A., Dmitriev A. V., Klimov P. M. Spatial Features of SFE Current Systems and Geomagnetic Pulsations PSFE Related to Gamma Radiation from Solar Flares. *Gamma Rays. Technology, Applications and Health Implications.* New York, Nova Publisher, 2013. 345 p.

### Информация об авторах

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

*Климов Петр Михайлович* — студент, кафедра информатики и кибернетики, Байкальский государственный университет экономики и права, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: klimovpm@rambler.ru.

### Authors

*Parkhomov Vladimir Aleksandrovich* — Doctor habil. (Physical and Mathematical Sciences), Professor, Department of Computer Science and Cybernetics, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin St., 664003, Irkutsk, e-mail: parhomov@isea.ru.

*Klimov Petr Mikhailovich* — student, Department of Computer Science and Cybernetics, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin St., 664003, Irkutsk, e-mail: klimovpm@rambler.ru.