

**ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ КАМЕРЫ ВСЕГО НЕБА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ В МАГНИТОСФЕРЕ**

Е.Е. Смотрова, О.С. Михайлова, П.Н. Магер, А.Б. Белецкий, Р.В. Васильев, Т.Е. Сыренова

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
katerina.smotrova@mail.ru

**APPLICATION OF THE ALL-SKY CAMERA DATA FOR THE STUDY
OF PHENOMENA OCCURRING IN THE MAGNETOSPHERE**

E.E. Smotrova, O.S. Mikhailova, P.N. Mager, A.B. Beletsky, R.V. Vasilyev, T.E. Syrenova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
katerina.smotrova@mail.ru

Аннотация. Представлена разработка программного комплекса с целью использования данных, полученных с помощью камеры всего неба ст. Исток (70.03° N, 88.01° E), для исследования явлений, протекающих в магнитосфере, совместно со спутниковыми данными. Программный комплекс включает несколько частей для обработки изображений и привязки их пикселей к геомагнитным координатам. Он позволяет также представить изображения полярных сияний в геомагнитных координатах для отслеживания временной динамики. Апробация программ на тестовом событии 2 декабря 2018 г. показала, что созданный программный комплекс позволит проводить анализ явлений, протекающих в магнитосфере, совместно со спутниковыми данными.

Ключевые слова: камера всего неба, полярные сияния, магнитосфера, геомагнитные координаты, атмосферное поглощение, эффект Ван Рина.

Abstract. We have developed the software package for using the image data obtained from the all-sky camera of the Istok station ($70:03^\circ$ N, $88:01^\circ$ E) to study phenomena occurring in the magnetosphere, together with satellite data. The software package includes several stages for image processing and binding their pixels to geomagnetic coordinates. The programs also allow you to present images of the auroras in geomagnetic coordinates to track time dynamics. The program testing with December 2, 2018 test event showed that the created software package will allow analyzing phenomena occurring in the magnetosphere, together with satellite data.

Keywords: all-sky camera, aurora, magnetosphere, geomagnetic coordinates, atmospheric extinction, Van Rhijn's effect.

Для изучения процессов, протекающих в магнитосфере, существует множество инструментов — как наземных, так и спутниковых. Среди наземных инструментов особое место занимают камеры всего неба. С их помощью получают изображения полярных сияний, представляющие собой свечения нейтральных частиц атмосферы из-за воздействия ускоренных и промодулированных УНЧ-волнами потоков заряженных электронов.

На сегодняшний день актуальным становится проведение совместного анализа спутниковых и наземных данных наблюдений для восстановления полной картины событий от магнитосферы до атмосферы, однако таких исследований крайне мало [Motoba et al., 2015]. Для этого необходимо проводить исследования событий в привязке к геомагнитным координатам. Такой подход позволит локализовать область магнитосферы, где произошло то или иное событие, вызвавшее наблюдаемое полярное сияние, и даст возможность эффективнее отбирать подходящие спутниковые данные для дальнейшего исследования и установления взаимосвязи наблюдаемых событий в магнитосфере и атмосфере. Также для качественного анализа необходима подготовка данных изображений и создание наиболее эффективного представления временной зависимости изменения полярных сияний. В работе представлены первые результаты работы программного комплекса, позволившие подготовить изображения полярных сияний для анализа магнитосферных явлений.

Использовались данные камеры всего неба, расположенной на станции Исток (70.03° N, 88.01° E)

Института солнечно-земной физики СО РАН. Камера была установлена в рамках международного проекта PWING, представляющего обширную сеть наземных инструментов. Сама камера имеет пять интерференционных фильтров, в которых данные имеют временное разрешение 1.5 мин, что является достаточным для исследования магнитосферных волновых явлений в миллигерцовом диапазоне [Shiokawa et al., 2017].

Программный комплекс был разделен на несколько частей.

1. пространственная калибровка и привязка географических координат к пикселям изображений;
2. преобразование географических координат в геомагнитные (система координат MAG или скорректированные геомагнитные координаты CGM);
3. обработка изображений;
4. графическое представление изображений полярных сияний в геомагнитной системе координат.

Для первого этапа была использована программа пространственной калибровки камеры всего неба по звездам и привязки к пикселям изображения значений географических координат, принцип которой представлен в работе [Сыренова и др., 2021].

Программа трансформации географических координат в геомагнитные была написана с использованием моделей магнитного поля вблизи поверхности Земли и на дальнем расстоянии. В качестве координат определялись магнитная широта и долгота с возможностью выбора систем координат MAG или CGM, их расчет производился по модели IGRF-13 [Alken et al., 2021]. Для всех систем проводился расчет

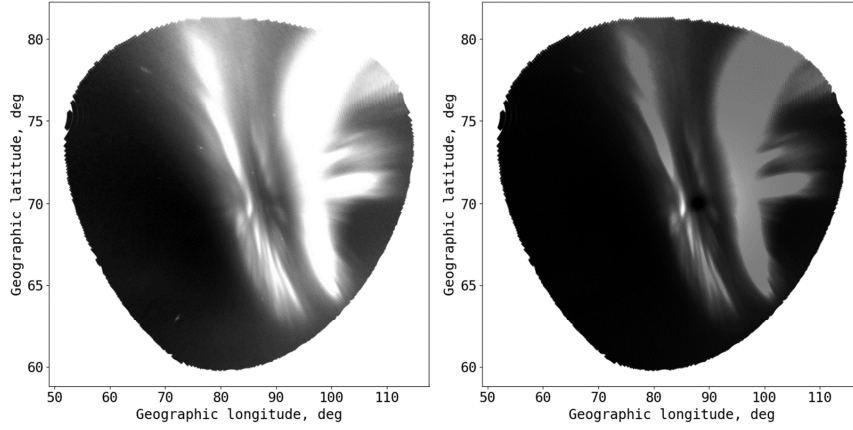


Рис. 1. Тестовое изображение пространственного распределения интенсивности атмосферной эмиссии атомарного кислорода 630 нм, зарегистрированное 02.12.2018 в 14:27:50 UT, с проведенной привязкой к географическим координатам на высоте 250 км. На левой панели изображение до проведения обработки, справа — после обработки

значений геомагнитных оболочек L , полученный путем использования модели Цыганенко T96 [Tsyganenko, 1996].

Обработка изображений имеет цель наилучшего визуального выделения авроральных структур. На данном этапе интенсивность на кадрах камеры представлена в условных единицах из-за отсутствия абсолютной калибровки спектральных каналов камеры и информации о распределении чувствительности по кадру. В ходе обработки проводится операция удаления звезд, для чего применялся метод статистических вариаций интенсивности, не дающий потери качества самого изображения [Kengne et al., 2013]. Также проводится коррекция атмосферных эффектов, таких как эффект Ван Рина и атмосферное поглощение, определяемые формулами:

$$I(\theta) = \left[1 - \left(\frac{R_E}{R_E + h_{ag}} \right)^2 \theta \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} I(\theta) = I_{true}(\theta) 10^{-0.4\alpha F(\theta)} \\ F(\theta) = (\cos \theta + 0.15(93.885 - \theta)^{-1.253})^{-1}, \end{cases} \quad (2)$$

где $I(\theta)$ — интенсивность под углом наклона θ ; R_E и h_{ag} — радиус Земли и высота наблюдаемого свечения соответственно; α — коэффициент атмосферного поглощения; $I_{true}(\theta)$ — интенсивность излучения от астрономического объекта [Kengne et al., 2013].

В конце проводится гамма-коррекция с целью улучшения динамического диапазона в темной области. Гамма-коррекция задается формулой

$$I_\gamma = I_{max} \left(\frac{I}{I_{max}} \right)^{1/\gamma}, \quad (3)$$

где I_{max} — максимальное значение интенсивности на кадре; $\gamma=0.45$ — гамма-параметр. Пример результата обработки изображения показан на рис. 1. Стоит отметить, что при коррекции атмосферного поглощения возникает дефект в виде темного пятна, который вызывает неправильную работу гамма-коррекции в результате чего кадр получается затемненным. Возможным способом решения является оценка атмо-

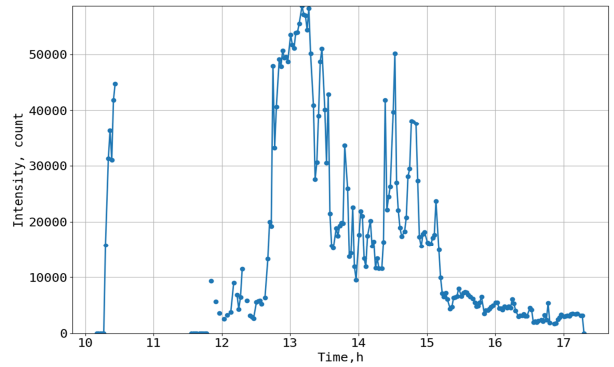


Рис. 2. Изменение интенсивности полярного сияния со временем вдоль траектории спутника ARASE (ERG) 2 декабря 2018 г. с 15:00 до 17:30 UT

ферного поглощения и уточнение параметров функции $F(\theta)$ формулы (2) для каждого интерференционного фильтра.

Полученные после обработки изображения и значения геомагнитных координат послужили входными данными ряда программ для создания графических представлений полярных сияний. Основной задачей было отражение временной динамики изменения интенсивности полярных сияний. Разработанный программный комплекс предоставляет возможность построения как статичных кадров, так и анимации полярных сияний в выбранной геомагнитной системе координат. Он позволяет также проводить построение кеограмм в системах координат MAG и CGM по заданным значениям геомагнитных координат. Кроме того, в комплекс включена программа, проводящая срез значений интенсивности изображения вдоль траектории спутника, спроецированных на высвечивающийся слой. При проведении среза пользователем задается разброс значений наземных координат, совпадающий с проекцией траектории спутника. Для координатной сетки, полученной для камеры всего неба станции Исток, оптимальным является выбор разброса географической широты и долготы 0.05° и 0.06° соответственно, что составляет максимальный шаг по координатной сетке, полученной на высоте 250 км. Апробация была проведена на траек-

тории космического аппарата ARASE (ERG) за 2 декабря 2018 г. Результат показан на рис. 2.

Таким образом, на примере данных камеры всего неба ст. Исток показана возможность использования разработанного программного комплекса для проведения совместного анализа магнитосферных явлений с помощью наземных оптических и спутниковых данных. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. Географическая привязка кадров широкоугольных систем. *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91, вып. 12. С. 1990–1996.

Alken P., Thébaud E., Beggan C.D., et al. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*. 2021. No. 73. P. 49.

Kengne F.F., Mundra R., Rangel M.A. Mid-latitude All-Sky Imager Network for geophysical observation. *WPI – 2013*.

Motoba T., Takahashi K., Ukhorskiy A., et al. Link between premidnight second harmonic poloidal waves and auroral undulations: conjugate observations with a Van Allen Probe spacecraft and a THEMIS all-sky imager. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. No. 120. P. 1814–1831.

Shiokawa K., Katoh Y., Hamaguchi Y., et al. Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network. *Earth, Planets and Space*. 2017. No. 69.

Tsyganenko N.A. Effects of the solar wind conditions on the global magnetospheric configuration as deduced from data-based field models. *Proc. the Third International Conference on Substorms (ICS-3)*. Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA-SP. 1996. No. 389. P. 181–185.