

УДК 520.24; 523.7:

Разработка и применение спектрально-частотного метода для исследований поверхностей безатмосферных тел

В.В. Бусарев¹, В.В. Прокофьева-Михайловская², А.Н. Рублевский²

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ), МГУ, Университетский пр., 13, 119992, Москва, Россия
e-mail: busarev@sai.msu.ru;

²НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
e-mail: prok@crao.crimea.ua; mtm500@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 15 октября 2008 г.

Аннотация. В НИИ “КрАО” разрабатывается и применяется спектрально-частотный метод исследования поверхностей безатмосферных тел Солнечной системы. Спектры отражения астероидов 21 Лютеция и 4 Веста и частотный анализ полученных данных позволили дистанционным методом оценить размеры гидросиликатных пятен на поверхностях этих астероидов и подтвердить гипотезу о доставке гидросиликатов примитивными телами. Сделаны оценки размеров цветочных пятен на астероиде 4 Веста и показано, что известный крупный кратер является образованием относительно молодым.

ELABORATION AND APPLICATION OF SPECTRAL-FREQUENCY METHOD FOR INVESTIGATIONS OF SURFACES OF ATMOSPHERELESS BODIES, *by V.V. Busarev, V.V. Prokofjeva-Mikhailovskaja, A.N. Rublevskiy.* The spectral-frequency method for investigation of surfaces of atmosphereless bodies is developed and applied in Scientific-research institute CrAO. Reflectance spectra of asteroids 21 Lutetia and 4 Vesta and the frequency analysis of data obtained from them made possible estimation of sizes of hydrosilicate spots on the surfaces of the asteroids by the remote method and confirmation of a hypothesis about delivery of hydrosilicates by primitive bodies. Estimations of color spot sizes are performed on asteroid 4 Vesta and it is shown that known large crater is a relatively young formation.

Ключевые слова: астероиды, реголит, космогония

1 Введение

Современная космогоническая теория рассматривает Солнечную систему как сложный самоупорядочивающийся объект, обладающий различными источниками энергии и множеством комплексных процессов. Наблюдается картина тесной физической связи всех тел Солнечной системы. Астероиды или малые планеты наряду со спутниками больших планет, кометами и метеоритными телами принадлежат к огромному классу малых тел Солнечной системы. Многие спутники больших планет физически и по размерам сравнимы с астероидами. У некоторых астероидов наблюдается газовыделение как у комет, а многие кометы, покрывшись в процессе эволюции твердой корой, неотличимы по своим свойствам от астероидов. Метеорные потоки, состоящие из микрометеоритов и пыли, вторгающиеся в

земную атмосферу, могут быть связаны как с кометами (в большинстве случаев), так и с астероидами. Все малые тела хранят в себе информацию о составе первичного вещества протопланетного облака и находятся в состоянии непрерывной динамической эволюции. Решение фундаментальных проблем возникновения и формирования Солнечной системы требует в настоящее время всестороннего исследования малых тел Солнечной системы.

С зарождением космической эры быстрое развитие получили методы дистанционного зондирования Земли. Можно сделать вывод, что перед современной астрофизикой стоит задача разработки методов дистанционного зондирования поверхностей малых тел Солнечной системы с целью получения максимально возможной информации об их химическом составе и свойствах их поверхностей. Такие работы по разработке и применению нового спектрально-частотного метода для исследования поверхностей астероидов начаты в НИИ “КрАО” совместно с МГУ ГАИШ несколько лет тому назад и подробно описаны в журнале “Успехи физических наук” (Бусарев и др., 2007). Целью исследований является получение с помощью дистанционных средств информации о поверхностях безатмосферных тел.

Метод имеет исторические предпосылки. Известно, что на кривых блеска астероидов наблюдаются кратковременные изменения. В книге “Астероиды” авторы (Бернс и Тедеско, 1979) приводят формулу, по которой можно определить размер детали L :

$$L = \pi D \Delta t / P_{rot}, \quad (1)$$

где D – диаметр астероида, Δt – длительность регистрации детали на кривой блеска, P_{rot} – период вращения астероида.

Авторы спектрально-частотного метода разработали и опробовали современную методику определения длительности Δt . Для этого они заменили величину Δt на половину величины найденного по наблюдательным данным периода p . Формула (1) преобразуется в формулу (2):

$$L = \pi D p / 2P_{rot}. \quad (2)$$

Солнечное излучение, рассеянное безатмосферным телом, содержит информацию не только о крупномасштабной структуре и степени шероховатости его поверхности, но и о составе вещества. Регистрируемое рассеянное излучение при наблюдениях вращающегося небесного тела модулируется по интенсивности. Модуляция эта составляет единицы процентов, но современная наблюдательная аппаратура позволяет надежно регистрировать такие изменения.

2 Методика спектральных телевизионных наблюдений малых тел в НИИ “КрАО”

Спектрофотометрические наблюдения астероидов проводятся в НИИ “КрАО” на цифровом телевизионном комплексе полуметрового менискового телескопа МТМ-500 (Прокофьева, 1987; Бочков и др., 2002). 500-мм менисковый телескоп системы Максудова ($D/F = 1/13$) изготовлен в Ленинграде фирмой ЛОМО и вошел в строй в КрАО в 1951 году. Он имеет параллактическую установку немецкого типа. Наведение телескопа на нужную область неба осуществляется вручную, а для коррекции его положения в пределах нескольких градусов используется дистанционное управление, имеющее тонкое, среднее и грубое движение. Изображение звездного поля выводится в фокус Кудэ, где оно поворачивается синхронно с часовым движением телескопа. На телескопе МТМ-500 с 1963 г. была установлена высокочувствительная телевизионная аппаратура, изготовленная в Москве по заказу В.Б. Никонова и П.П. Добронравина, заместителя директора КрАО. Светоприемная аппаратура установлена в фокусе Куде. Для этого впоследствии был сделан специальный каркас, который соединялся с телескопом и отслеживал его часовое движение.

Ведущий инженер телескопа и телевизионного комплекса А.Н. Абраменко внес большой вклад в разработку методики телевизионных наблюдений и в совершенствование аппаратуры (Абраменко и др., 1984). Модернизация управления телескопом, проведенная им, обеспечивает автоматическое отслеживание движения астероидов на фоне звезд. Удобная система воздушного охлаждения передающей телевизионной трубки конструкции А.Н. Абраменко поддерживает заданную температуру передающей трубки около 0° , что повышает ее чувствительность в десятки раз и значительно увеличивает проникающую способность аппаратуры. Оригинальное электронное управление работой передающей трубки обеспечивает наблюдения с очень короткими экспозициями, вплоть до миллисекунд. С 1977 г. в качестве приемника света используется передающая трубка типа суперизокон (ЛИ 804), которая имеет каскад электронно-оптического усиления света. Трубка была разработана в Ленинграде в НПО "Электрон" под руководством доктора технических наук Н.Д. Галинского. С 1982 г. в телевизионной аппаратуре производится запись данных наблюдений в ЭВМ при цифровой регистрации части телевизионного кадра (в виде строба).

Телескоп в настоящее время оборудован и оригинальным афокальным бесщелевым спектрографом прямого зрения с прозрачными дифракционными решетками (Проник, Шарипова, 1992). Диспергирующая аппаратура изготовлена в трех экземплярах. Схема оптического блока представлена на рис. 1. Линзы изготовлены в оптической мастерской КрАО, а прозрачные решетки, имеющие высокую концентрацию света в первом порядке (70%), были нанесены на плоские поверхности отрицательных линз в Ленинграде в Государственном оптическом институте. С целью обеспечения различной дисперсии в оптических системах нанесены разные прозрачные решетки, имеющие 100, 150 и 200 штр/мм и обеспечивающие разрешение 60 \AA , 40 \AA и 30 \AA . Линзы с решетками укреплены в окнах турели, управление которой осуществляется с пульта телевизионной установки. Свободное от оптических систем окно турели позволяет наблюдать выбранный участок неба и производить быстрое отождествление исследуемого объекта. Бесщелевой спектрограф с набором прозрачных дифракционных решеток позволяет регистрировать спектры точечных объектов до 14^m за время экспозиции несколько минут.

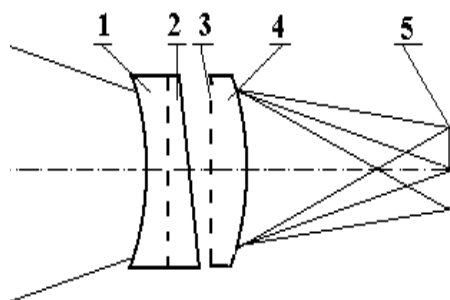


Рис. 1. Оптическая схема афокального дифракционного спектрографа 1 – отрицательная линза, создающая параллельный пучок света, 2 – призма небольшого угла отклонения, 3 – прозрачная дифракционная решетка, 4 – положительная линза, 5 – спектр исследуемого объекта

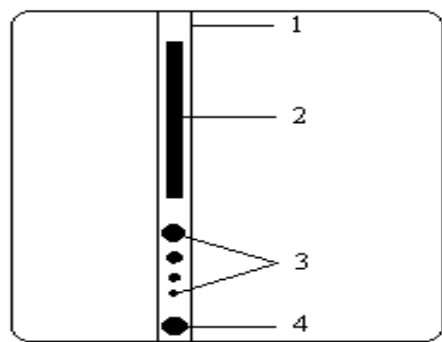


Рис. 2. Вид спектра на телевизионном экране, 1 – строб, выделяющий изображение спектра, 2 – спектр, 3 – калибровка энергетическая, состоящая из 4-х звездообразных изображений, 4 – нулевой порядок спектра

Методика спектрофотометрических наблюдений разрабатывалась в течение нескольких лет В.В. Прокофьевой совместно с Л.М. Шариповой под непосредственным руководством В.Б. Никонова и при постоянных консультациях со стороны А.В. Харитонova, председателя группы

Астросовета по спектрофотометрическим стандартам и каталогам. Авторы разработки методики многократно участвовали в конференциях, проводимых Астросоветом АН СССР по вопросам абсолютной спектрофотометрии. Л.М. Шариповой по предложению А.В. Харитоновы были проведены специальные наблюдения ряда звезд в области Северного Полярного ряда. Сравнение полученных данных с данными каталогов показало высокую точность наблюдений, достигающую 1 % (Прокофьева и Шарипова, 1996, 2001; Прокофьева и др., 2001).

Кратко укажем основные моменты разработанной методики. Все записи спектров исследуемых объектов имеют энергетическую калибровку. Для этого одновременно с наблюдениями спектров записывается интенсивность искусственного калиброванного источника света, сделанного в виде 4-х изображений звезд (рис. 2), блеск которых привязан к блеску звезд-стандартов (Прокофьева и др., 1993; Абраменко и Таран, 2003). Сразу после записи спектров астероида всегда записывается спектр звезды-стандарта. Наблюдения спектрофотометрических стандартов позволяют следить за спектральной экстинкцией земной атмосферы и определять абсолютное внеатмосферное распределение энергии в спектрах астероидов. Внеатмосферные спектральные освещенности астероидов определяются как методом дифференциальной спектрофотометрии, так и фундаментальной, опирающейся на искусственный фотометрический стандарт. Наблюдения звезд-стандартов солнечного типа позволяют исключить спектр Солнца и получить спектр отражения поверхности астероида (Бусарев и др., 2007). Точность относительных измерений интенсивностей в записях спектров астероидов 7–12^м, полученных с экспозициями от 0.5 до 6 минут и со спектральным разрешением 60 или 40 Å, составляет 1–2 %.

Исследования поверхностей астероидов проводятся по спектрам отражения. Для анализа желательно использовать плотные ряды спектральных наблюдений, когда условия освещения Солнцем исследуемого астероида изменяются незначительно. По нормированным спектрам отражения рассчитываются “вторичные” данные (эквивалентная ширина полосы поглощения, имеющей минералогическое значение, или показатель цвета), которые подвергаются частотному анализу (Бусарев и др., 2007). Точность анализируемых данных должна быть высокой, что обеспечивает регистрацию периодичностей с малыми амплитудами. Перед началом поиска периодов из данных удаляются их изменения, связанные с периодом вращения астероида. Затем производится последовательный поиск значимых периодичностей. Каждый раз после определения периода производится его вычитание из данных наблюдений и проводится поиск следующего значимого периода. Так осуществляется процедура отбеливания данных за найденные периоды (Теребиж, 1992). Как показывает опыт, при достаточно высокой точности наблюдений можно обнаружить до двух десятков периодов, а значит, и получить оценки около двух десятков различных размеров деталей. При этих оценках размеров пятен предполагается, что они расположены в экваториальной зоне астероида.

3 Результаты, полученные в НИИ “КрАО” при исследованиях поверхностей астероидов 1620 Географ, 21 Лютетия и 4 Веста

Наблюдения астероидов проводились на телевизионном комплексе телескопа МТМ-500 с использованием бесщелевого афокального спектрографа с прозрачной решеткой, имеющей 200 штр/мм и 150 штр/мм. С помощью спектрально-частотного метода были обработаны спектрофотометрические наблюдения трех астероидов: 1620 Географ, 21 Лютетия и 4 Веста. Для поиска периодов применялась программа “Period” (Прокофьева и др., 1995). Программа позволяла оперативно просматривать свертки данных с найденным периодом, а также подбирать степень полинома для аппроксимации медленных изменений яркости или кривой блеска.

Астероид 1620 Географ. Этот астероид имеет размер 4•1.5 км и принадлежит к группе сближающихся с Землей астероидов (АСЗ). Он наблюдался в сентябре-октябре 1994 г. Данные

были получены в инструментальной фотометрической системе, близкой к системе V. По фотометрии астероида 1620 Географ, полученной в первичном и вторичном максимумах его блеска, были сделаны оценки размеров неоднородностей его поверхности. Они показали наличие крупной детали размером 1–1.2 км на одной стороне астероида и более мелких, размером до 150–100 м – на другой (Карачкина и Прокофьева, 1997). Сделанные по фотометрии оценки размеров деталей согласуются с данными радиолокации, полученными Остро и др. (1996).

Астероид 21 Лютеция. Астероид является объектом, включенным в план работы космической миссии “Rosetta” (Бусарев и др., 2004), поэтому предварительное исследование его поверхности наземными методами представляет значительный интерес. В период с 31 августа по 20 ноября 2000 г. было получено около 50 спектров Лютеции и столько же спектров солнечного аналога HD10307 (G2V) и региональных стандартов с разрешением 40 и 30 Å (Прокофьева и др., 2005). По данным определены синтетические звездные величины астероида в цветовой системе B, V, R, а также рассчитаны спектры его отражения в диапазоне 370–740 нм (рис. 3).

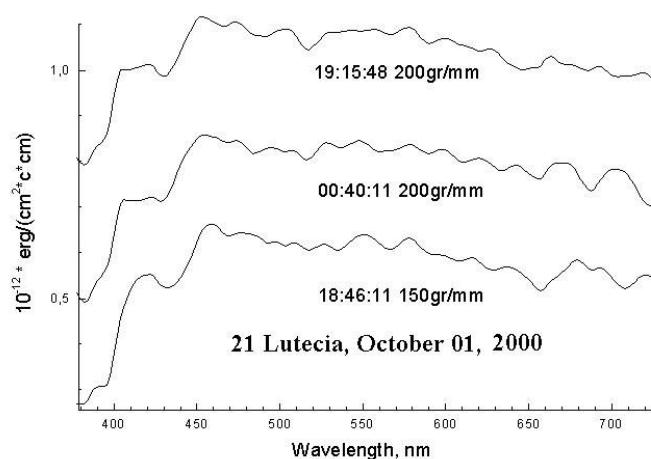


Рис. 3. Спектры отражения астероида 21 Лютеция, полученные 1 октября 2000 г. на телевизионном комплексе телескопа МТМ-500 с прозрачными дифракционными решетками, имеющими 200 и 150 штр/мм. В области длин волн 440 нм видна полоса поглощения гидросиликатов

По спектрам отражения астероида рассчитаны значения эквивалентной ширины наиболее интенсивной полосы поглощения с центром в 430–440 нм, приписываемой гидросиликатам типа серпентина (Бусарев и др., 2004). Частотный анализ эквивалентных ширин полосы поглощения гидросиликатов свидетельствует о наличии многих значимых частот, расположенных в основном в диапазоне 15–20 с/d, которые могут порождаться неоднородным распределением гидратированного вещества на поверхности Лютеции. Оценка величины этих неоднородностей или пятен на поверхности астероида показала, что их размеры составляют от 3–5 км до 70 км, причем наиболее часто встречающийся размер 30–40 км. На основании предположения о существовании связи пятен гидросиликатов с кратерами выполнено сравнение полученных данных с результатами статистической обработки Скобелевой Т.П. (1987) размеров кратеров с пересекающимися валами. Сделан вывод, что гидросиликатные пятна на поверхности астероида могут быть образованиями молодыми. Таким образом, спектральные наблюдения астероида 21 Лютеция, их обработка и частотный анализ результатов подтверждают гипотезу о доставке гидросиликатов на поверхность астероида при его низкоскоростных соударениях с более примитивными телами (Бусарев и др. 2004). В этом

случае гидросиликаты могут быть распределены по поверхности астероида в виде отдельных пятен определенных размеров.

Отметим, что частотный анализ величин $V(1, 0)$ подтвердил период вращения Лютетии $0,^d3405 (8,^h172)$. Проведенные позже наблюдения астероида одновременно в полосах В, V, R и анализ показателей цвета В–V и V–R не дали значимых колебаний с этим периодом. Был сделан вывод о возможной двойственности астероида 21 Лютетия (Прокофьева и др., 2006; Прокофьева-Михайловская и др., 2007).

Астероид 4 Веста. Астероид является целью исследований с борта космического аппарата Dawn, который запущен 27 сентября 2007 года. Его сближение с астероидом планируется в 2011 г. Поэтому все новые сведения о поверхности астероида являются чрезвычайно важными.

Задача исследования наличия гидросиликатов на поверхности астероида 4 Веста и оценка их размеров потребовала использования наблюдений спектров, полученных за короткий промежуток времени. Этому удовлетворяли спектральные наблюдения В.В. Бочкова, проведенные 2, 3, 4 и 7 февраля 2002 г. Использованы цифровые записи спектров астероида, полученные с помощью телевизионной аппаратуры и бесщелевого афокального спектрографа на телескопе МТМ-500. Спектральное разрешение, обусловленное качеством изображений, составляло около 40 Å, время экспозиции – 30 сек. Энергетическая калибровка велась как по искусственному стандарту на светодиодах, так и по трем звездам-стандартам. По данным о полосе поглощения гидросиликатов, расположенной около 430–440 нм в спектрах отражения астероида, были вычислены величины ее эквивалентной ширины. Применение частотного анализа с последовательным отбеливанием величин эквивалентной ширины этой полосы поглощения за найденные периоды позволило найти 16 независимых периодов. Размеры гидросиликатных пятен на поверхности астероида 4 Веста были нами оценены по величине найденных периодов. Оценки показали, что преимущественно имеются размеры гидросиликатных пятен от 50 до 13 км и только два крупных размера около 700–800 км. Сделано предположение, что крупные размеры представляют собой скопления мелких пятен возле известного крупного кратера, расположенного в южном полушарии астероида. На основании статистики Скобелевой (1987) можно предполагать, что гидросиликатные пятна на поверхности астероида 4 Веста являются образованиями молодыми. Авторами статьи (Прокофьева-Михайловская и др., 2008) сделаны следующие выводы:

- 1) подтверждено наличие водных соединений на поверхности астероида 4 Веста;
- 2) имеются два крупных размера и большое количество мелких размеров пятен;
- 3) большое число мелких пятен позволяет предположить, что гидросиликаты относительно недавно занесены на поверхность Весты при ее столкновении с примитивным телом.

Определены также размеры цветных пятен на поверхности астероида 4 Веста с помощью спектрально-частотного метода. По внеатмосферным спектрам астероида, полученным В.В. Бочковым, были рассчитаны синтетические показатели цвета В–V и V–R. Из этих данных были удалены их изменения с фазой вращения астероида. После этого произведен поиск периодов, причем каждый раз производилось отбеливание данных за найденный период. Были найдены 20 размеров пятен в длинноволновой области спектра и 19 – в коротковолновой. Наименьший размер пятна составил около 9 км. Отчетливо выделился в синей области спектра известный размер кратера, расположенного в южном полушарии астероида. Статистические оценки красноватых пятен и сравнение со статистикой старых кратеров позволили сделать предположение, что на астероиде Веста красноватые пятна являются старыми образованиями, а голубоватые пятна образовались сравнительно недавно (Прокофьева-Михайловская и др., 2008).

4 Заключение

Таким образом, развитие методов наблюдений астрономических объектов, а также методов анализа полученных спектральных данных позволяет создать новый, спектрально-частотный метод исследований безатмосферных тел Солнечной системы.

Нами разработан и опробован спектрально-частотный метод (СЧМ) регистрации деталей на поверхностях астероидов с помощью обработки данных спектров отражения и частотного анализа рядов данных наблюдений с последующим отбеливанием за найденные периоды. С его помощью производится уверенная оценка размеров цветowych и спектральных пятен на поверхностях астероидов. Новый метод позволяет наземными средствами получать информацию о размерах деталей на поверхностях астероидов, выполняя дистанционное зондирование их поверхностей. Опыт показал, что метод применим к исследованию распределения по поверхности химико-минералогических особенностей (например, 21 Лютеция и 4 Веста), цветowych пятен (4 Веста) и альбедных (или структурных) деталей поверхностей (1620 Географ).

Большое количество оценок размеров пятен разного типа позволяет применять элементы статистики и делать предположения о возрасте различных образований на поверхностях тел Солнечной системы. В частности, применение этого метода для обнаружения гидросиликатов на Лютеции дало возможность установить пятнообразный характер распределения этих материалов по поверхности астероида, определить размеры этих пятен и в первом приближении оценить их статистику. Оказалось, что пятна гидросиликатов на поверхности Лютеции имеют преимущественно небольшие размеры. Это позволило сделать предположение об их сравнительно недавнем происхождении и подтвердить гипотезу о метеороидном занесении гидросиликатов на поверхность астероида 21 Лютеция, прошедшего магматическую стадию эволюции.

Следует также отметить, что новый спектрально-частотный метод применим для исследований всех безатмосферных тел, включая и искусственные спутники Земли. В настоящее время их количество огромно и требуется разработка методов, позволяющих проводить точную идентификацию безатмосферных тел, а также методов, позволяющих решать обратные задачи с целью определения их формы и деталей конструкции.

Литература

- Абраменко А.Н., Агапов Е.С., Анисимов В.Ф., Галинский Н.Д., Прокофьева В.В., Синенко С.М. // Телевизионная астрономия/ Ред. Никонов В.Б. 2-ое изд. М.: «Наука». 1984. С. 272.
- Абраменко А.Н., Таран А.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99. С. 181.
- Бернс и Тедеско (Burns J.A., Tedesco E.F.) // 1979 Asteroids I/ Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press. P. 494.
- Бочков В.В., Прокофьева В.В., Абраменко А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 136.
- Бусарев и др. (Busarev V.V., Bochkov V.V., Prokof'eva V.V., Taran M. N.) // "The new ROSETTA targets Kluwer Acad. Publishers"/ Eds L. Colangeli et al. 2004. P. 79.
- Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Бочков В.В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. №. 6. С. 663.
- Карачкина Л.Г., Прокофьева В.В. // Проблемы небесной механики. Прогр. Тезисы. Всеросс. конф. СПб.: ИТА МИПАО. 1997. С. 95.
- Остро и др. (Ostro S.J., Jurgens R.F., Rosema K.D., et al.). // Icarus. 1996. V. 121. P. 46.
- Проник В.И., Шарипова Л.М. // Авторское свидетельство №1822932 Госкомитета по изобретениям и открытиям при госкомитете СССР по науке и технике. 12 окт. 1992 г.
- Прокофьева В.В. // Сообщ. Спец. Астрофиз. Обсерв. Вып. 56. 1987. С. 46.

- Прокофьева В.В., Бочков В.В., Павленко Е.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1993. Т. 88. С. 109.
- Прокофьева В.В., Таращук В.П., Горькавый Н.Н. // Успехи физ. наук. 1995. Т. 165. №. 6. С. 661.
- Прокофьева и Шарипова (Prokof'eva V.V. and Sharipova L.M.) // Kinem. i Fiz. Nebesn. Tel. 1996. V. 13. №. 3. P. 82.
- Прокофьева и Шарипова (Prokof'eva V.V., Sharipova L.M.) // Proceedings of international conference "AstroKazan-2001". Astronomy and geodesy in new millennium. Kazan State University: Publisher «DAS». 2001. P. 276.
- Прокофьева и др. (Prokof'eva V.V., Bochkov V.V., Abramenko A.N.) // JENAM. 2001. Eur. Astron. Soc. 2001. P. 241.
- Прокофьева В.В., Бочков В.В., Бусарев В.В. // Астрон. вестник. 2005. Т. 39. №. 5. С. 457.
- Прокофьева В.В., Бочков В.В., Бусарев В.В. // Астрон. вестник. 2006. Т. 40. №. 6. С. 512.
- Прокофьева-Михайловская В.В., Батраков Ю.В., Бочков В.В., Бусарев В.В., Карачкина. Л.Г. // Астрон. вестник. 2007. Т. 41. №. 4. С. 337.
- Прокофьева-Михайловская и др. // Астрон. вестник. 2008. Т. 42. №. 6 (в печати).
- Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н., Бочков В.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. №. 1. С. 218.
- Скобелева Т.П. // Астрон. вестник. 1987. Т. 21. №. 3. С. 221.
- Теребиж В.Ю. // Анализ временных рядов в астрофизике. М.: Наука. 1992.