

УДК 523.45+523.2

Фотометрия Ио и Европы в НИИ “КрАО” и причины различий результатов наземных и космических наблюдений

*А.Н. Абраменко, Г.В. Байда, А.В. Закревский, Л.Г. Карачкина,
В.В. Прокофьева-Михайловская, Е.А. Сергеева*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
prok@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 31 декабря 2010 г.

Аннотация. В течение 4-х лет в НИИ “КрАО” были проведены фотометрические наблюдения спутников Юпитера Ио и Европы в спектральной полосе V и построены их кривые блеска, приведенные к фазовому углу Солнца 6^0 . Сравнение данных с другими наземными наблюдениями показало достаточно хорошее согласие. Подтверждена причина, почему близкие к Юпитеру спутники имеют более яркое ведущее полушарие. У спутников Ио и Европы, находящихся в быстровращающемся магнитном поле Юпитера, ведомые полушария подвержены бомбардировке заряженными частицами магнитного поля. Неучет различий в блеске двух полушарий спутников при анализе космических данных приводит к заметной разнице с данными наземной фотометрии.

PHOTOMETRY OF IO AND EUROPE IN THE SRI CRAO AND REASONS OF DIFFERENCES BETWEEN EARTH AND SPACE RESULTS, *by A.N. Abramenko, G.V. Bayda, A.V. Zakrevskij, L.G. Karachkina, V.V. Prokofjeva-Mikhaylovskaya, E.A. Sergeeva.* Photometric observations of Jupiter’s satellites Io and Europe were performed in the spectral band V in the Scientific Research Institute “CrAO” during 4 years. Their light curves were calculated to the phase angle of the Sun equal to 6^0 . Comparison of data with other Earth observations showed good agreement. The reason, why close to Jupiter satellites have bright leading hemispheres was confirmed. Satellites Io and Europe, located in the rapidly rotating magnetic field of Jupiter, have trailing hemispheres which are exposed by the bombardment of charged particles of the magnetic field. As differences between two hemispheres of satellites were not taken into account in the analysis of space data, there is an essential discrepancy with Earth photometry data.

Ключевые слова: галилеевы спутники, фотометрия, космические исследования

1 Введение

Ио и Европа являются двумя из четырех галилеевых спутников Юпитера, фотометрические наблюдения которых ведутся в НИИ “КрАО”. Цель наблюдений – выяснить причину расхождения данных фотометрии спутников, полученной с помощью космических аппаратов и в результате наземных наблюдений. Сильные расхождения наземных и космических данных для фотометрии двух других галилеевых спутников, Ганимеда и Каллисто, были проанализированы в предыдущей статье авторов (Прокофьева-Михайловская и др., 2010). В статье была высказана мысль, что расхождение вызвано пиком обратного когерентного рассеяния солнечного света на поверхностях спутников при

их наблюдениях с Земли, которые проводятся при солнечных фазовых углах спутников от 1° до 12° . Наблюдения же с борта КА проводились при разных солнечных фазовых углах спутников.

Расхождение для космических и наземных данных для спутников Ио и Европа невелико (Емельянов и Гильбер, 2006) несмотря на то, что поверхности этих спутников имеют ярко выраженные особенности. Рассмотрим результаты наземной фотометрии спутников Юпитера Ио и Европа отдельно в данной статье. Напомним, что Ио и Европа являются синхронными спутниками и всегда обращены к Юпитеру одной стороной. На их поверхности выделяют ведущее полушарие и ведомое. Согласно влиянию космической погоды и бомбардировке малыми телами Солнечной системы, эти полушария имеют различную отражательную способность. Известно, что спутники Ио, Европа и Ганимед находятся в орбитальном резонансе – их орбитальные периоды относятся как 1:2:4. В то время как Ганимед делает один оборот вокруг Юпитера, Европа делает два, а Ио – четыре.

В статье приводятся результаты наземных фотометрических наблюдений спутников Юпитера Ио и Европы и полученных кривых блеска, приведенных к фазовому углу Солнца 6° , а также рассмотрены причины расхождения полученных с Земли кривых блеска и рассчитанных теоретически на основе данных космических аппаратов, о чем написано в статье (Емельянов и Гильбер, 2006).

2 Исследования Ио и Европы с помощью космических аппаратов

Основные данные о поверхностях рассматриваемых спутников были получены из фотографий, сделанных многими космическими аппаратами, работавшими или пролетавшими около Юпитера. Первые фотографии Ио и Европы из космоса были сделаны станцией “Пионер-11”, пролетевшей мимо Юпитера в декабре 1974 г. В марте 1979 г. мимо Ио прошел КА “Вояджер-1” на расстоянии 20 тыс. км, а в июле – “Вояджер-2” на расстоянии 1.1 млн. км. Аппараты передали высококачественные снимки спутника, обнаружили активный вулканизм, и провели ряд измерений (Буратти и Веверка, 1983; Симонелли и Веверка, 1984). Гипотеза о существовании на спутнике Европа жидкого океана появилась благодаря данным “Вояджеров”.

С декабря 1995 г. по сентябрь 2003 г. систему спутников Юпитера изучал КА “Галилео”. С помощью аппарата “Галилео” была открыта магнитосфера Ио, получены новые доказательства в пользу существования жидкого океана на спутнике Европа.

В декабре 2000 г. мимо Юпитера прошел КА “Кассини”, который получил с помощью чувствительного ультрафиолетового спектрометра новые данные о плазменном торе Ио. В феврале 2007 г. мимо Юпитера пролетел КА “Новые горизонты”, который осуществил фотографирование Ио, что позволило оценить новые изменения поверхности спутника. Были проведены также исследования спутников Ио и Европа с помощью космического телескопа им. Хаббла.

НАСА сейчас прорабатывает проект “Jupiter Europa Orbiter”, предполагающий вывод на орбиту спутника Европа космического аппарата с целью его подробного изучения. Директор Института космических исследований Л.М. Зелёный сообщил, что планируется направить к Европе несколько космических аппаратов. Спускаемый аппарат будет посажен в разломе льда на поверхности спутника с целью поиска простейших форм жизни. Проект под названием “Лаплас” включен в программу Европейского космического агентства на период с 2015 по 2025 гг. В нем примут участие и российские ученые.

3 Спутник Ио

Спутник Ио может быть классифицирован как один из самых необыкновенных спутников нашей Солнечной системы. Альbedo поверхности Ио равно 0.62. Радиус орбиты составляет $421.7 \cdot 10^3$ км, или 5.95 радиуса Юпитера, эксцентриситет – 0.004, наклон орбиты – $0.^\circ 040$, период обращения вокруг Юпитера – 1.7691 суток. Средняя температура поверхности Ио составляет -143°C . Средний размер радиуса Ио сейчас оценивается как 1820 км. Это немногим больше размера Луны (см. рис. 1).

Основной характерной особенностью поверхности Ио является вулканизм. Конфигурация извержений меняется очень быстро. Жерла многих вулканов имеют огромные размеры. Вулканические плюмажи поднимаются на 70–280 км над поверхностью спутника, скорость выброса составляет



Рис. 1. Сравнительные размеры Ио, Луны и Земли (<http://wopedia.org/wiki>)

около 1 км/сек. (см. рис. 2 и 3). Слабое гравитационное поле Ио, по-видимому, позволяет газу, выброшенному из вулканов, достигать чрезвычайных высот. Плюмажи состоят в основном из серы и диоксида серы. Вследствие бурной вулканической деятельности поверхность Ио полностью изменяется в течение нескольких сотен лет.

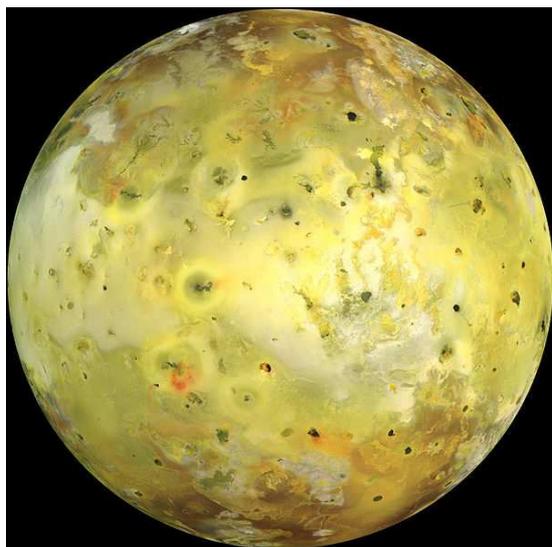


Рис. 2. Снимок Ио сделан КА “Галилео” (взято с сайта <http://ru.wikipedia.org/wiki>)

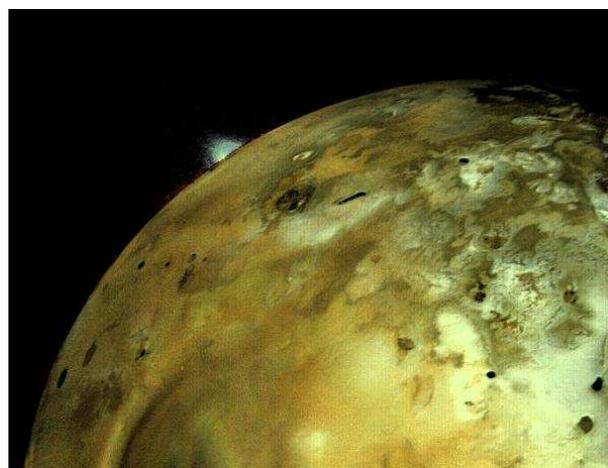


Рис. 3. Извержение на Ио, снятое “Вояджером-1”. Высота фонтана – свыше 160 км

Ударные кратеры на Ио практически отсутствуют, так как уничтожаются постоянной вулканической деятельностью – извержениями и потоками лавы.

Энергия для вулканической активности вырабатывается благодаря приливным гравитационным воздействиям со стороны Юпитера, Европы и Ганимеда. Они вызывают колебания поверхности Ио по вертикали на величину до 100 м. Как только Ио приближается к определенной точке относительно Европы и Ганимеда, их влияние искажает его орбиту. За каждый оборот Ио дважды изменяет

орбиту, смещаясь радиально на 10 км “вверх” и “вниз” относительно Юпитера. Орбита становится не совсем круговой, хотя ее эксцентриситет всего 0.004. Ио имеет приливной выступ и испытывает сильную либрацию. Благодаря этому в недрах Ио выделяется огромная энергия, достигающая 60–80 трлн Ватт.

Предсказание теории о приливном характере вулканизма на Ио нашло подтверждение: извержения были предсказаны на основе анализа взаимных возмущений галилеевых спутников, что было опубликовано незадолго до сближения с Ио космического аппарата “Вояджер-1”, зарегистрировавшего 8 активных извержений. Через 4 месяца “Вояджер-2” обнаружил, что 7 из них еще продолжают извергаться. В феврале 2001 года на Ио было зафиксировано самое мощное извержение, предположительной мощностью 78 тыс. ГВт. Для сравнения, последнее извержение Этны обладало мощностью “всего” 12 тыс. ГВт.

Состав продуктов извержения – сера, сернистый газ и некоторые сульфиды, которые придают оранжевый цвет поверхности Ио. Пестрая раскраска спутника объясняется свойством серы сохранять после остывания свой цвет, полученный при нагреве до высоких температур. Поскольку сера во время извержений разогревается до разных температур, то получаются разные цвета. Кроме того, соединения серы также имеют широкий цветовой спектр.

В дополнение к вулканам на Ио имеются невулканические горы, озера расплавленной серы, вязкие лавовые потоки длиной до нескольких сотен километров, кальдеры глубиной до нескольких километров. Поверхность спутника, вероятно, содержит силикаты (горные породы) и соединения серы. Измерения, проведенные телескопом им. Хаббла, выявили высокое содержание натрия. Возможно, химический состав разных участков поверхности спутника значительно варьируется.

В отличие от других галилеевых спутников на Ио нет воды или льда. Возможно, это стало результатом того, что Юпитер на ранних стадиях эволюции был значительно более горячим, что привело к выметанию летучих веществ с Ио. Этим Ио сильно отличается от других галилеевых спутников, которые в значительной своей части состоят из водяного льда.

На Ио обнаружена крайне разреженная атмосфера, состоящая из двуокиси серы и других газов. Ее плотность в 10–100 млн раз меньше, чем у поверхности Земли. Различия между показаниями КА “Пионер” и “Галилео” указывают на то, что атмосфера и ионосфера Ио изменяются в зависимости от вулканической активности.

Орбита Ио расположена в той части магнитосферы Юпитера, где потоки заряженных частиц особенно плотны – внутри интенсивного радиационного пояса электронов и ионов (<http://galspace.spb.ru/index47.html>). Магнитосфера вращается вместе с Юпитером с периодом около 10 часов. Есть предположение, что она сметает с поверхности Ио около 1000 кг вещества в секунду. Благодаря быстрому вращению магнитного поля Юпитера, заряженные частицы создают вдоль орбиты Ио плазменный тор, содержащий ионы натрия, водорода, серы и кислорода. Температура в торе оценивается как 50000° – 100000° К. Это означает, что в тор накачивается огромная энергия порядка 500 тыс. МВт. Материал тора вращается со скоростью, почти равной скорости магнитосферы Юпитера, поэтому частицы в нем движутся намного быстрее, чем Ио. Их относительная скорость достигает 57 км/сек, что вызывает интенсивную бомбардировку вращающейся поверхности спутника и ежесекундно выбивает из нее примерно тонну сернистого газа, который поступает в тор уже в виде однократно и двукратно ионизованных атомов серы и ионизованного кислорода. Из тора исходит интенсивное излучение сильно ионизованных паров серы на длинах волн 953 и 672 нм. По данным КА “Галилео” Ио обладает собственным магнитным полем, что свидетельствует о наличии у него расплавленного железистого ядра. Ио генерирует сильные электрические разряды. Их мощность достигает 1000 ГВт, а разность потенциалов – 400 кВ. В результате происходят мощные радиовсплески. Электроток течет благодаря наличию ионизованных атомов, которые покидают Ио объемами несколько тысяч килограммов в секунду. Ио взаимодействует с магнитосферой Юпитера и тором, образуя естественный мощный электрический генератор, создающий напряжение 400 тыс. В и генерируя электрический ток около 5 млн А, который течет вдоль силовых линий магнитного поля к ионосфере Юпитера, образуя так называемую токовую трубку.

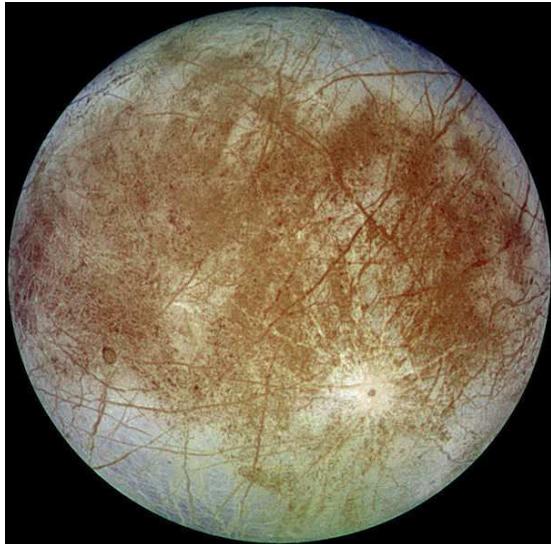


Рис. 4. Изображение спутника Европа, полученное с помощью КА “Галилео” (<http://ru.wikipedia.org/wiki>)



Рис. 5. Крупный кратер на поверхности спутника Юпитера Европа (<http://ru.wikipedia.org/wiki>)

Поверхность Ио считается молодой, около 1 млн. лет, что было установлено по отсутствию метеоритных кратеров. Поверхность спутника составляют продукты извержений, причем толщина слоя отложений оценивается от 3–4 до 20–30 км.

4 Спутник Европа

Европа по размеру является наименьшим из галилеевых спутников, ее радиус всего 1530 км. Радиус его орбиты составляет 671034 км или 9.47 радиуса Юпитера, эксцентриситет – 0.009, наклон орбиты – $0^{\circ}.470$. Период обращения вокруг Юпитера составляет 3.551181041 суток. Альbedo спутника – 0.68. Высокое альbedo спутника свидетельствует о том, что поверхность спутника покрыта довольно чистым льдом.

В 1960-е годы с помощью спектроскопии было показано, что Европа покрыта водяным льдом. При температуре поверхности 110° К у экватора и около 50° К у полюсов спутника этот лед должен быть твердым. За последние 20 лет изображения, полученные космическими аппаратами, показали молодую и чрезвычайно деформированную поверхность. Появилась гипотеза, что в недрах Европы находится океан жидкой воды.

Из данных, полученных в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, делается вывод, что внешняя водно-ледяная кора Европы имеет глубину порядка 100 км. На Европе нет возвышенностей более 100 м высотой. Это одно из самых гладких твердых тел в Солнечной системе. Фотографии, полученные “Вояджерами” в 1979 г., показали гладкий шар, на котором яркие равнины были покрыты перекрещенными полосами и горными хребтами. На Европе было найдено только семь кратеров с диаметрами 10–30 км.

Космический корабль “Галилео” в 2000 году обнаружил крупный кратер (рис. 4 и 5). Он является результатом сравнительно недавнего столкновения кометы или астероида с поверхностью Европы. Кратер имеет диаметр около 80 км, а светлые лучи простираются почти на 800 км. Из подсчета

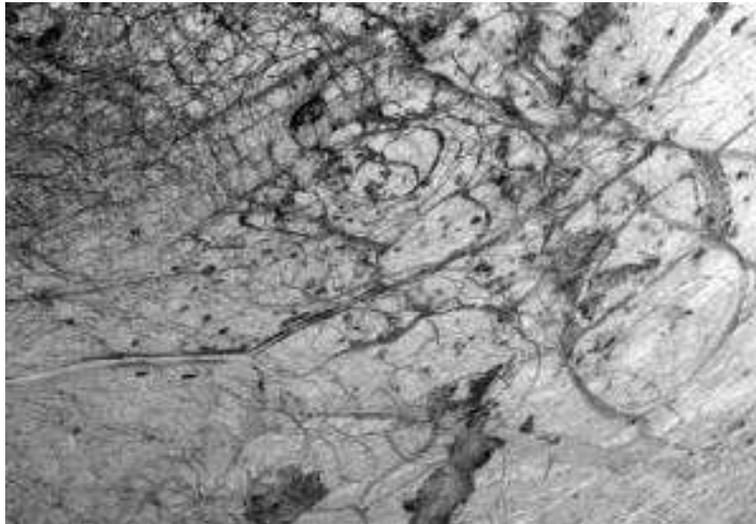


Рис. 6. Сеть круговых трещин на Европе (<http://galspace.spb.ru/index47-1.html>)

количества кратеров, больших 10 км, Шумейкер вычислил, что поверхность Европы имеет возраст около 1.5 млн лет. С учетом более мелких кратеров ученые пришли к выводу, что поверхность Европы имеет возраст около 30 млн лет.

Европа в значительной степени состоит из горных пород и полностью покрыта слоем воды и льда. Далее залегают горные породы, а в центре предположительно находится небольшое металлическое ядро. Химический состав недр Европы, скорее всего, похож на состав Ио: железистое ядро и силикатно-серосодержащие породы. Гравитационные измерения, проведенные КА “Галилео”, также подтвердили строение тела Европы: твердое ядро и водно-ледяной покров толщиной около 100 км. Впрочем, оценки толщины ледяного покрова у разных авторов сильно варьируются.

Когда КА “Галилео” приблизился на расстояние 586 км, было обнаружено, что ледовый слой Европы является довольно тонким и покрывает поверхность жидкой воды. В некоторых областях лед разломан на большие куски. Под ледяной коркой находится жидкий океан. Глубина океана достигает 90 км; его объем превышает объем мирового океана Земли.

Вся поверхность Европы испещрена множеством пересекающихся линий. Это разломы и трещины ледяного покрова (см. рис. 6). Для снятия появляющихся напряжений происходят трясения, вследствие которых появляются новые трещины на ледяной коре. Некоторые линии почти полностью опоясывают планету. Ледяная кора довольно подвижна и неоднократно раскалывалась от внутренних напряжений и крупномасштабных тектонических процессов.

Космический аппарат “Галилео” нашел на Европе ионосферу, что указывает на существование атмосферы у спутника. С помощью орбитального телескопа им. Хаббла у Европы были замечены следы очень слабой атмосферы, давление которой не превосходит 1 микропаскаль. Атмосфера состоит из кислорода, образовавшегося в итоге разложения льда на водород и кислород под воздействием солнечной радиации, причем легкий водород при низком тяготении спутника быстро улетучивается в космос.

На поверхности спутника наблюдается высокая радиация, так как орбита Европы проходит через мощный радиационный пояс Юпитера. Магнитные полюса расположены вблизи экватора спутника и постоянно смещаются. Существование подповерхностного океана подтверждается переменным характером магнитного поля Европы. Конфигурации мощности и ориентации поля коррелируют с прохождением Европы через магнитное поле Юпитера. Это можно объяснить наличием токопроводящей воды под поверхностью спутника: мощное магнитное поле Юпитера вызывает электротоки в соленом океане Европы, которые и формируют ее необыкновенное магнитное поле.

Спектральный анализ темных линий и пятен на поверхности показал наличие солей, в частности сульфата магния, а также сернистых и железистых веществ. По-видимому, эти соли содержатся в океане Европы. Считается, что Европа содержит крупнейшие месторождения сульфата магния в Солнечной системе.

Был предложен возможный способ разогрева недр Европы – рассеяние приливной энергии. Взаимное гравитационное взаимодействие делает ее орбиту эллиптической, что в свою очередь приводит к периодическому изменению величины постоянных крупномасштабных приливов, вызываемых Юпитером. Европа, находящаяся от Юпитера дальше Ио, нагревается меньше. Приливы поднимают поверхность спутника на высоту до 30 метров. Вычисления показали, что ее недра должны прогреться достаточно, чтобы лед ниже глубины 20–30 км расплавился и образовал подповерхностный океан. Тепло, нужное для поддержания его в жидком состоянии, предположительно вырабатывается за счет приливных взаимодействий с Юпитером, Ио и Ганимедом.

5 Фотометрические наблюдения Ио и Европы, полученные в НИИ “КрАО” в 2006–2009 гг.

Наблюдения спутников Юпитера Ио и Европы проводились в НИИ “КрАО” в 2006–2009 гг. Использовалась астрономическая телевизионная установка (Абраменко и др., 1984), позволяющая производить оцифровку изображений и суммирование данных от нескольких сотен телевизионных кадров в памяти ЭВМ, которое производилось только по данным, находящимся внутри строба (Абраменко и др., 1983). Передающая телевизионная трубка была установлена в фокусе куде телескопа МТМ-500. Методика наблюдений и обработки спутников, а также система искусственного затмения Юпитера были описаны в предыдущей статье (Прокофьева-Михайловская и др., 2010).

Работа телевизионной установки, ее модернизация и подготовка к наблюдениям спутников Юпитера обеспечивалась инженером-электронщиком первой категории А.Н. Абраменко. Под его руководством А.В. Закревский и Г.В. Байда в настоящее время улучшили стабилизацию источника питания 15 кВ и работу видеотракта передающей камеры, отремонтировали стабилизированный источник питания 2.2 кВ, стабилизатор токов фокусирующих катушек, а также систему, обеспечивающую одновременные наблюдения спутников Юпитера в спектральных полосах В, V, R (Абраменко и др., 1984).

Таблица 1. Условия наблюдений галилеевых спутников Юпитера Ио и Европы в течение 2006–2009 гг.

Год наблюдений	Диапазон наблюдений (дата, месяц)	Склонение Юпитера	Удаление Юпитера от эклиптики	Кол-во записей в полосе V	
				Ио	Европа
2006	29.04–30.08	$-13^{\circ}23' \div -15^{\circ}00'$	$-3^{\circ}.46' \div -2^{\circ}.99'$	7	18(4)
2007	28.04–05.09	$-2124 \div -2215$	$-2.95 \div -2.63$	18(12)	17
2008	31.05–30.10	$-2149 \div -2310$	$-1.52 \div -1.36$	17(23)	39(9)
2009	03.07–30.08	$-1336 \div -1552$	$+0.4 \div +0.5$	69	67
2006–2009	Общее	число	наблюдений	146	154

Наблюдения галилеевых спутников в НИИ “КрАО” проводились одновременно в полосах, близких к цветовой системе BVR Джонсона и Моргана и отдельно в полосе V (см. столбцы 5 и 6 таблицы 1). В первом столбце таблицы 1 указан год наблюдений, во втором – дата и месяц начала и конца наблюдений спутников, в третьем и четвертом – диапазон изменений склонений Юпитера и удаление Юпитера от эклиптики во время наблюдений в градусах, в пятом и шестом – число определений блеска спутников Ио и Европы, полученных в течение каждого года из одновременных

BVR-наблюдений и наблюдений отдельно в полосе V (даны в скобках). В нижней строке приведено общее число наблюдений для этих спутников.

К сожалению, склонение Юпитера в эти годы было отрицательным (столбец 3 таблицы 1), что позволяло проводить наблюдения спутников только на протяжении короткого промежутка времени в течение ночи. Не использовались наблюдения, полученные на воздушных массах более 2.5. Примерно 10 % результатов наблюдений были исключены из-за неустойчивой прозрачности земной атмосферы. Изменения удаления Юпитера от плоскости эклиптики в течение разных лет (столбец 4 таблицы 1) привели к небольшим изменениям солнечных фазовых углов спутников, что могло повлиять на яркость деталей на их поверхностях.

Во время наблюдений, после регистрации данного спутника Юпитера, в том же режиме регистрировались звезды-стандарты. Для определения экстинкции в течение каждой ночи наблюдений проводилось несколько регистраций одних и тех же стандартных звезд. Для этого были использованы звезды типа G, имеющие блеск в полосе V от $4.^m56$ до $6.^m0$ и расположенные не далее $2-3^\circ$ от Юпитера. Стандарты были взяты из каталога (Корнилов и др., 1991). По записям стандартов определялись средние значения экстинкции земной атмосферы для каждой ночи наблюдений. Математическая обработка полученных наблюдений проводилась согласно разработанной в КрАО методике (Прокофьева и др., 1992, 1993).

Так как наблюдения спутников Ио и Европа проводились как в отдельных светофильтрах, так и одновременно в трех областях спектра (BVR), вычисление внеатмосферного блеска спутников в полосе V в системе Джонсона-Моргана было проведено по двум формулам (1 и 2), имеющим различные значения для первого и третьего членов.

Формула для получения внеатмосферного блеска в системе Джонсона-Моргана при наблюдениях отдельно в фильтре V приведена ниже (Прокофьева-Михайловская и др., 2010):

$$V = V_{01} - \alpha_V F(z) + V_{in1}, \quad (1)$$

V_{01} – нуль-пункт инструментальной шкалы звездных величин при наблюдениях, полученных в фильтре V, $\alpha_V F(z)$ – фактор ослабления света в земной атмосфере, где α_V – коэффициент экстинкции в полосе V, а $F(z)$ – воздушная масса, на которой проводились наблюдения спутников, V_{in1} – инструментальная звездная величина спутника в полосе V при наблюдениях в одной полосе V. Использовалось значение $V_{01} = 10.^m20$.

Внеатмосферный блеск спутников в полосе V в системе Джонсона-Моргана при одновременных наблюдениях спутников в полосах B, V и R определялся по формуле:

$$V = V_{02} - \alpha_V F(z) + V_{in2}, \quad (2)$$

где V_{02} – нуль-пункт инструментальной шкалы звездных величин при одновременных наблюдениях в трех областях спектра, второй член $\alpha_V F(z)$ тот же, что и в формуле (1), V_{in2} – инструментальная звездная величина спутника в полосе V при одновременных наблюдениях в полосах B, V и R. Величина V_{02} определялась по наблюдениям стандартных звезд в течение десятков ночей. В расчетах использовалось значение $V_{02} = 9.^m76$.

Цифровая телевизионная аппаратура при суммировании в памяти ЭВМ 500–1000 телевизионных кадров, что было при наших наблюдениях, обеспечивает точность регистрации инструментального значения блеска V наблюдаемого объекта $\pm 0.^m005$ (Абраменко и др., 1984, стр. 199). По нашим оценкам, ошибка определения V_{01} и V_{02} не превышает также $\pm 0.^m005$, а определение экстинкции за каждую ночь, проводившееся с помощью нескольких близких к Юпитеру стандартов, внесло ошибку порядка $\pm 0.^m01$. Точность определения блеска спутников в стандартной фотометрической системе составляет около $\pm 0.^m02$.

Полученные внеатмосферные звездные величины спутников были приведены к расстояниям, равным одной астрономической единице от Земли и Солнца по формуле:

$$V(1, 1, \alpha) = V - 5lg(r\Delta), \quad (3)$$

где $V(1, 1, \alpha)$ – значение блеска спутника на единичном расстоянии от Земли и Солнца, r – расстояние от Солнца, Δ – расстояние от Земли.

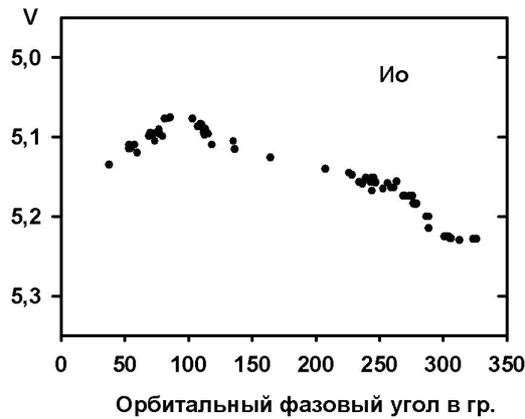


Рис. 7. Кривая блеска спутника Юпитера Ио в спектральной полосе V

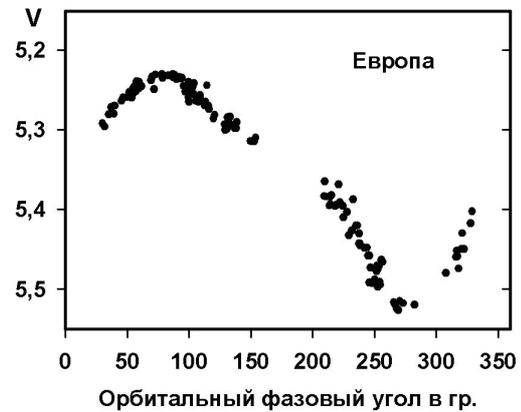


Рис. 8. Кривая блеска спутника Юпитера Европа в спектральной полосе V

Для построения кривых блеска в полосе V все данные наблюдений были приведены к солнечному фазовому углу спутников 6° согласно зависимости, приведенной в статье (Моррисон и Моррисон, 1980). Коэффициенты линейных частей фазовых кривых (параметры наклона) равны для Ио и Европы соответственно $G = 0.022 \pm 0.004$ и $G = 0.006 \pm 0.003$. Для солнечных фазовых углов спутников от 0° до 4° звездные величины вычислялись по формуле, учитывающей наблюдаемый эффект противостояния. Приведение к фазовому углу 6° проводилось с учетом величины $\Delta V = -2.5 \log[(1 - G)F_1 + GF_2]$ (Брумберг и др., 2004), где G – параметры наклона, а

$$F_i = \exp \left\{ -A_i \left[\tan \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]^{B_i} \right\}, \quad (4)$$

где $i = 1, 2$; $A_1 = 3.33$, $A_2 = 1.87$; $B_1 = 0.063$, $B_2 = 1.22$; $0 < \beta < 120^\circ$.

Полученные в НИИ “КрАО” кривые блеска Ио и Европы в полосе V приведены на рис. 7 и 8. По осям абсцисс и ординат на этих рисунках указаны орбитальный фазовый угол спутника и его внеатмосферный блеск в стандартной фотометрической системе V соответственно. Амплитуда изменения блеска для Ио составляет $0.^m14$, а для Европы она значительно больше и составляет $0.^m29$.

Изменения яркости Ио показывают монотонное увеличение блеска до долготы примерно 80° , затем блеск примерно до 250° медленно и монотонно уменьшается; после 260° – 270° уменьшение происходит быстрее, до 300° , затем опять замедляется. Сравнение полученной нами кривой блеска Ио с кривой блеска в полосе V, приведенной в статье (Моррисон и Моррисон, 1980), показывает, что кривые блеска практически повторяют друг друга. Яркость спутника Европа имеет максимум на долготе около 80° , затем блеск уменьшается нелинейно примерно до 210° , после этого наблюдается резкий минимум на долготе 270° – 280° . Сравнение данных рисунка 8 с аналогичной кривой, приведенной в статье (Моррисон и Моррисон, 1980), показывает, что ход кривых блеска спутника Европа совпадает. Сравнение наших кривых блеска с данными Довгопола и Шавловского (1986) по зависимости отражательной способности Ио и Европы от орбитального фазового угла при солнечном фазовом угле 6° показало также совпадение хода кривых. Поэтому сделан вывод о том, что кривые блеска, приведенные на рис. 7 и 8, хорошо подтверждают более ранние фотометрические наблюдения спутников Ио и Европы.

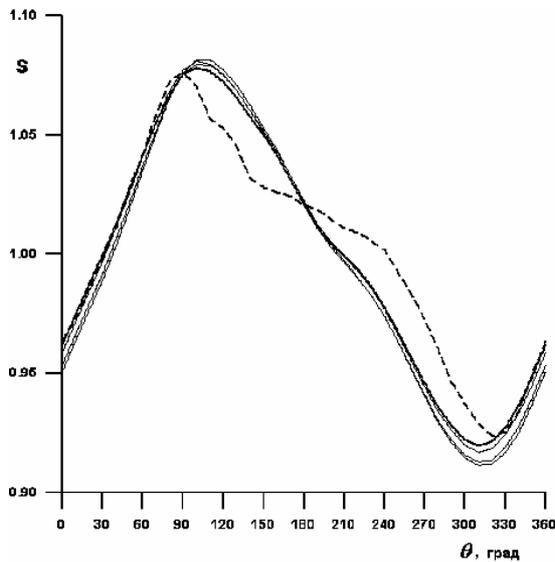


Рис. 9. Сравнение космических (сплошные линии) и наземных (пунктир) данных фотометрии Ио в зависимости от фазы вращения

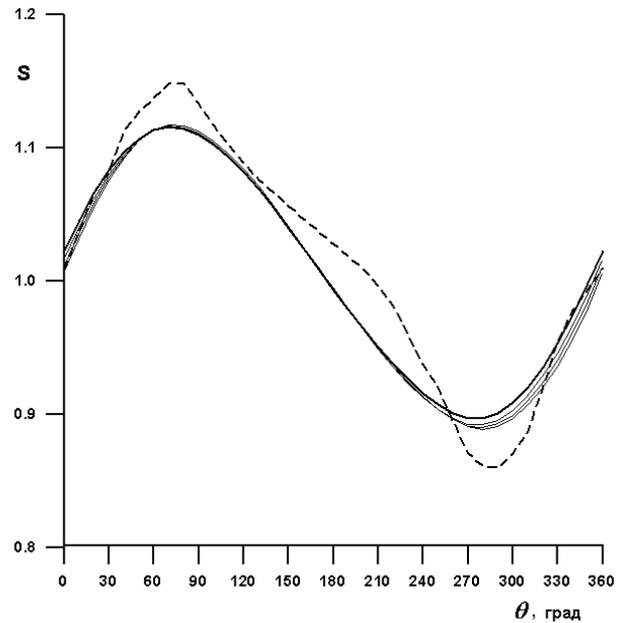


Рис. 10. Сравнение космических (сплошные линии) и наземных (пунктир) данных фотометрии Европы в зависимости от фазы вращения

6 Возможная причина расхождения данных наземной и космической фотометрии спутников Юпитера Ио и Европы

Расхождение данных наземных и космических наблюдений было обнаружено при исследовании взаимных явлений спутников Юпитера (Емельянов, Гильбер, 2006). При выполнении расчетов кривых блеска спутников Ио и Европа были использованы закон отражения света Халке и карты, полученные по наблюдениям космических аппаратов (<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/JupiterSatellites/>). На рис. 9 и 10 приведено сделанное в публикации сравнение кривых блеска спутников Юпитера Ио и Европы в полосе V, основанных на космических фотографиях (толстая сплошная кривая построена для фазового угла Солнца 0° , три тонкие кривые – для солнечных фазовых углов 4° , 8° и 12°) и наземных наблюдениях (пунктирные кривые). По осям ординат на рис. 9 и 10 отложена относительная интегральная яркость спутников.

Рассмотрим отличия пунктирных и сплошных кривых на рис. 9 и рис. 10. Отметим, что сравнение кривых, полученных из данных космических наблюдений, с кривыми блеска, полученными в НИИ “КрАО” при фотометрических наблюдениях, затруднено различием шкал по осям ординат на рис. 7 и 8 и на рис. 9 и 10. Поэтому здесь проведено только сравнение хода кривых в зависимости от орбитальной долготы спутника.

Острый максимум на кривой блеска Ио на рис. 7 находится на орбитальной долготе примерно 80° . На рис. 9 пунктирная кривая имеет максимум раньше сплошных кривых примерно на той же долготе. При дальнейшем увеличении долготы блеск спутника V уменьшается сначала резко, а потом замедляется до долготы около 240° , затем продолжает быстро уменьшаться, и минимум наступает при долготе более 300° . Пунктирная кривая на рис. 9 соответствует такому ходу изменения блеска спутника Ио.

Максимум на кривой блеска Европы на рис. 8 находится на орбитальной долготе около 80° . На рис. 10 пунктирная кривая имеет острый максимум одновременно со сплошными кривыми примерно на той же долготе. При дальнейшем увеличении долготы блеск спутника V уменьшается сначала быстро примерно до долготы 130° , а затем медленно примерно до долготы 210° , после этой долготы продолжается более быстрое уменьшение блеска, и минимум наступает при долготе около 280° . После этого блеск Европы быстро растет. Пунктирная кривая, приведенная на рис. 9, соответствует такому же ходу изменения яркости спутника.

Мы высказываем предположение, что отличие наземных и космических кривых в области 150° – 240° может быть обусловлено обратным когерентным рассеянием на лучах яркого крупного кратера на поверхности Европы. Известно, что некоторые породы реголита могут давать широкий максимум когерентного рассеяния, который может наблюдаться и при солнечном фазовом угле 6° (Тишковец и др., 2004). Возможно, что здесь имеет место и эффект ближнего поля (Петрова и др., 2007). Природа этого отличия может быть предметом другой статьи.

Ио и Европа находятся недалеко от Юпитера. Радиусы их орбит составляют около 6 и 9.5 радиусов Юпитера (Моррисон и др., 1980). Они находятся в сильном магнитном поле Юпитера (напряженность которого в районе магнитных полюсов составляет 11–15 Гс, что больше земной более чем в десять раз), которое вращается, делая, как и Юпитер, полный оборот примерно за 10 часов. Таким образом, можно заключить, что магнитные силовые линии мощного поля Юпитера догоняют и перегоняют эти спутники. При этом происходит бомбардировка ведомых полушарий спутников частицами, находящимися в магнитном поле Юпитера. Как отмечено выше, эта бомбардировка ведомой стороны спутника Ио заряженными частицами происходит со скоростями 57 км/сек. Меньшая скорость бомбардировки ведомого полушария имеет место у Европы, которая находится в 1.6 раза дальше от Юпитера, чем Ио.

Мы предполагаем (так же как написано в книге под редакцией Багенал и др., изданной в Кембридже в 2005 г.), что этой бомбардировкой ведомых полушарий и вызвано отличие отражательных способностей двух полушарий Ио и Европы. Этот механизм делает ведущие полушария спутников Ио и Европа более яркими, чем полушария ведомые.

Отметим, что амплитуда изменений отражательной способности у Европы при ее вращении вокруг Юпитера почти в два раза превосходит амплитуду Ио. Это свидетельствует о том, что разница отражательных способностей ведущего и ведомого полушарий у Европы почти в два раза больше, чем у Ио. Возможно, это отличие вызвано тем, что орбита Ио находится внутри плазменного тора, образованного его высокой вулканической активностью. Это может несколько уменьшать разницу отражательной способности его ведущего и ведомого полушарий по сравнению с Европой. Интересно отметить, что ведущие полушария малых внутренних спутников Юпитера Тебы и Амальтеи также ярче их ведомых полушарий, что отмечено в автореферате кандидатской диссертации И.В. Кулик (2005). Это также можно объяснить влиянием быстро вращающегося магнитного поля Юпитера, что приводит к потемнению ведомого полушария.

С Земли у спутника Юпитера Каллисто наблюдается обратное соотношение между ведущим и ведомым полушариями – ведомое полушарие более яркое. Каллисто имеет радиус орбиты около 2 млн. км, что составляет около 26.6 радиусов Юпитера. Его ведущее полушарие, по-видимому, подвержено бомбардировке кометами, астероидами, частицами солнечного ветра. Он является поэтому самым кратерированным объектом Солнечной системы. То же соотношение яркостей ведущего и ведомого полушарий наблюдается у далекого спутника Сатурна Япета, находящегося на расстоянии 59 радиусов Сатурна от планеты: его ведомое полушарие в 6 раз ярче ведущего, что удивляло ученых (<http://www.astrogalaxy.ru/forum/phpBB2/viewtopic.php?t=2992>).

Мелкие детали отличий наземных и космических кривых блеска Европы, возможно, обусловлены отражательной способностью некоторых ледяных образований на ее поверхности. Тут могут работать как эффекты обратного когерентного рассеяния, так и ближнего поля и, возможно (но маловероятно), теневой эффект.

На рис. 10 пунктирная кривая и сплошные кривые отличаются в трех местах (примерно около 80° , 150° – 240° и 270° – 300°). Амплитуда кривой блеска, наблюдаемой с Земли, превышает амплитуду, полученную по данным космических аппаратов. Максимумы пунктирных кривых находятся около

долготы 80° , то есть почти при полной видимости ведущих полушарий спутников. Из этого можно сделать вывод, что ведущие полушария являются у этих двух спутников более яркими, чем ведомые. Это подтверждается также данными об отражательной способности поверхностей этих спутников, полученных в статьях А.Н. Довгопола и В.И. Шавловского (1985, 1986). Обратим внимание, что пунктирные кривые на рис. 9 пересекают сплошные примерно при орбитальной долготе спутника около 180° , то есть в тот момент, когда начинает увеличиваться видимость ведомого полушария Ио.

7 Выводы

Кратко можно сделать следующие выводы. Большое количество наблюдений Ио и Европы, полученных в НИИ “КрАО” в течение 4-х лет в полосе V и приведенных к фазовому углу Солнца 6° , позволили построить достаточно уверенные кривые блеска спутников в полосе V фотометрической системы Джонсона. Сравнение полученных кривых блеска с опубликованными данными наземных наблюдений хорошо подтверждает их сходимость. В статье описана гипотеза о том, что спутники, находящиеся в сильном магнитном поле Юпитера и Сатурна, имеют более яркое ведущее полушарие. Известно, что спутники Каллисто и Япет, находящиеся далеко от этих планет, имеют более темное ведущее полушарие, что можно объяснить бомбардировкой его межпланетной пылью, астероидами и кометами.

Поверхность спутников Ио и Европа еще несет в себе ряд загадок, которые могут быть объяснены при последующих детальном исследовании этих спутников. Например, подробные исследования поляризации отраженного галилеевыми спутниками солнечного света уже сейчас ставят ряд проблем, требующих подробных объяснений (Мищенко и др., 2010).

Авторы глубоко благодарны Н.В. Емельянову за интерес к работе и ценные замечания.

Авторы предлагают использовать наши фотометрические наблюдения Ио и Европы. Для их получения надо обратиться к Карачкиной Людмиле Георгиевне по адресу: morozova4848@mail.ru.

Литература

- Абраменко А.Н., Агапов Е.С., Анисимов В.Ф. и др. // Телевизионная астрономия. М.: Наука. 1984. С. 199.
- Абраменко А.Н., Александрин Ю.С., Якушин В.Н., Прокофьева В.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 66. С. 218.
- Багенал и др. (Bagenal F., Dowling T., MacKinnon W. eds.) // Jupiter: The planet, satellites and magnetosphere. Cambridge. University Press. 2005.
- Брумберг В.А., Глебова Н.И., Лукашова М.В. и др. // Эфемеридная астрономия. Спб: 2004.
- Буратти и Веверка (Buratti B. and Veverka J.) // Icarus. 1983. V. 55. P. 93.
- Довгопол А.Н., Шавловский В.И. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1985. Т. 1. С. 29.
- Довгопол А.Н., Шавловский В.И. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1986. Т. 2. С. 48.
- Емельянов и Гильбер (Emelyanov N.V. and Gilber R.) // Astron. Astrophys. 2006. V. 453. P. 1141.
- Корнилов В.Г., Волков И.М., Захаров А.И. и др. // Труды ГАИШ. 1991. Т. 63. С. 5.
- Мищенко и др. (Mishchenko M.I., Rosenbush V.K., Kiselev N.N., et al.) // Polarimetric remote sensing of solar system objects. Kiev. Akadempriodyka. 2010.
- Моррисон Д., Моррисон Н. // Спутники планет. М.: Мир. 1980.
- Моррисон Д., Крукшенк Д., Бернс Дж. // Спутники планет. М.: Мир. 1980.
- Петрова и др. (Petrova E.V., Tishkovets V.P., Jockers K.) // Icarus. 2007. V. 188. P. 233.
- Прокофьева В.В., Демчик М.И., Карачкина Л.Г., Павленко Е.П. // Астрон. вестник. 1992. Т. 26. С. 3.
- Прокофьева В.В., Бочков В.В., Павленко Е.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1993. Т. 88. С. 110.

- Прокофьева-Михайловская В.В., Абраменко А.Н., Байда Г.В. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2010. Т. 106. С. 100.
- Симонелли и Веверка (Simonelli D.P. and Veverka J.) // Icarus. 1984. V. 59. P. 406.
- Тишковец и др. (Tishkovets V.P., Petrova E.V., Jockers K.) // J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans. 2004. V. 86. P. 241.