

УДК 521.1:523.4

РЕЗУЛЬТАТЫ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДАЛЕКИХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА НА НОВОМ ТЕЛЕСКОПЕ КАВКАЗСКОЙ ГОРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ГАИШ МГУ

© 2020 г. Н. В. Емельянов^{a, b, *}, Б. С. Сафонов^a, О. В. Возякова^a, А. Ю. Тушканова^a

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

^bInstitut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides — Observatoire de Paris, UMR 8028 du CNRS, 77 avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France

*e-mail: emelia@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 23.10.2019 г.

После доработки 04.06.2020 г.

Принята к публикации 13.07.2020 г.

Пополнение базы данных наблюдений далеких спутников планет всегда полезно, поскольку точность моделей движения и эфемерид зависит не только от точности наблюдений. Точность улучшается с ростом интервала времени наблюдений. Поэтому наблюдения, выполненные даже с прежней точностью, оказываются востребованными. На Кавказской горной обсерватории (КГО) Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова на новом телескопе с диаметром зеркала 2.5 м в 2017 г. были проведены астрометрические наблюдения двух далеких спутников Юпитера. Получены 6 положений спутника J6 (Гималия) и 27 положений спутника J8 (Пасифе). Среднеквадратичные величины отклонений от эфемерид по всем 33 наблюдениям двух спутников составили: 0.085" по прямому восхождению и 0.064" по склонению. Такая точность соответствует современному уровню наземных наблюдений. Наши уточнения орбит для эфемеридного сервера MULTI-SAT по всем имеющимся наблюдениям показали, что средневзвешенные среднеквадратичные величины угловых отклонений измеренных положений от вычисленных для спутников J6 (Гималия) и J8 (Пасифе) составляют 0.22". При этом точность эфемерид оценивается в сервере MULTI-SAT для 2017 г. величиной 0.008" для J6 (Гималия) и 0.05" для J8 (Пасифе). Новые наблюдательные данные будут полезны для уточнения моделей движения далеких спутников Юпитера.

Ключевые слова: спутники Юпитера, наблюдения, астрометрия

DOI: 10.31857/S0320930X2006002X

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в моделировании динамики естественных спутников планет обеспечивается точными астрометрическими наблюдениями, выполненными в течение длительного промежутка времени. Астрометрические данные необходимы, чтобы уточнить параметры движения и получить новые, более точные сведения для описания эволюции орбит и выяснения происхождения спутников. Точность модели движения спутника планеты определяется не только точностью наблюдений, но также длительностью интервала времени наблюдений. Поэтому наблюдения нужно продолжать даже с прежней точностью. В базах данных накоплено уже много астрометрических наблюдений далеких спутников Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Однако наблюдения продолжаются, наблюдатели работают, базы данных по-

полняются. В частности, в 2014–2018 гг. на 11 обсерваториях мира получены 1986 астрометрических положений шести далеких спутников Юпитера: J6 (Гималия), J7 (Элара), J8 (Пасифе), J9 (Синопе), J10 (Лиситея), J11 (Карме).

Наблюдения далеких спутников планет публикуются, в основном, в Циркулярах центра малых планет (Minor Planet Circulars). Свободный доступ к этим публикациям осуществляется через Интернет по адресу https://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html Наблюдения всех естественных спутников собираются в базе данных NSDB (Arlot, Emelyanov, 2009), доступной через Интернет по адресу <http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/obspos/index.html>

В Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова на

Кавказской горной обсерватории (КГО ГАИШ МГУ) недавно введен в эксплуатацию новый телескоп с диаметром зеркала 2.5 м. В 2017 г. на новом телескопе были проведены астрометрические наблюдения далеких спутников Юпитера. Мотивации проведения наблюдений, их обработки и подготовки результатов к публикации были следующими.

1. Следовало продемонстрировать возможности нового телескопа КГО ГАИШ МГУ.

2. Астрометрическая точность результатов оказалась высокой.

3. Новые наблюдения являются достойным вкладом в мировую базу данных.

Проведены наблюдения спутников J6 (Гималия), J8 (Пасифе). Получены 33 астрометрических положения спутников.

В настоящем сообщении дается описание средств и методов наблюдений, метода астрометрической обработки, приводятся результаты наблюдений и дается анализ точности наблюдений при сравнении с эфемеридами.

ПАРАМЕТРЫ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения выполнялись на основном телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО), имеющем диаметр апертуры 2.5 м. Диаметр тени оправы вторичного зеркала 1.0 м (Потанин и др., 2017). Корректор широкого поля, предусмотренный конструкцией телескопа, в данных наблюдениях не применялся.

В качестве фотоприемника использовался ПЗС-детектор с азотным охлаждением производства Niels Bohr Institute, аналогичный приемникам, описанным в работе (Andersen, 1998). Детектор постоянно установлен в фокусе Кассегрена и представляет собой мозаику из двух чипов E2V CCD44-82 размерами 2048×4104 пкс.

Линейные размеры пикселя 15 мкм, угловой масштаб камеры $0.15''/\text{пкс}$. Чипы составлены по длинной стороне, образуя квадратное поле зрения размерами $10.46' \times 10.26'$.

Шум считывания при рабочей температуре составляет 6.4 е.

Регистрация выполнялась в фильтрах r SDSS и R Bessel, кривые пропускания приведены в Интернет по адресу <http://lnfm1.sai.msu.ru/kgoinstruments/filters/>. Во время наблюдений Юпитер находился на высотах от 8° до 42° . Экспозиция во всех случаях была 300 с.

АСТРОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПОЛУЧЕНИЕ КООРДИНАТ СПУТНИКОВ

Обработка состояла из следующих этапов.

1. Вычитание смещения, вносимого на этапе считывания в аналогово-цифровом преобразователе ПЗС-матрицы. Для оценки величины смещения в горизонтальном регистре ПЗС-матрицы предусмотрены по 50 дополнительных пикселей до и после области, соответствующей светочувствительной части детектора. Эти пиксели не содержат фотоэлектронов. По среднему уровню сигнала в них оценивается величина смещения для данной строки, которая затем вычитается из каждого ее пикселя.

2. Коррекция нелинейности. Остаточная нелинейность составляет менее 0.1%.

3. Базовая редукция для компенсации свойств и дефектов ПЗС-матрицы посредством умножения результирующего изображения на выравнивающую матрицу, вычисленную из изображений плоского поля и темнового тока.

4. Поиск звезд. Для финальных этапов астрометрической редукции изображения с целью получения экваториальных координат объектов в качестве опорного каталога был выбран каталог Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018). Алгоритм, использованный для поиска звезд, основывался на анализе гистограмм нескольких отдельных фрагментов кадра, выбранных с зонами пересечения. Он позволил идентифицировать в кадре количество объектов, превышающее количество объектов каталога Gaia DR2 в поле зрения кадра ($10.46' \times 10.26'$).

5. Редукция влияния Юпитера. Выравнивающая матрица, компенсирующая градиент неравномерного фона, вычислялся по обработке отсчетов максимально приближенной к обрабатываемому объекту области, не содержащей других объектов.

6. Расчет координат центров объектов в системе матрицы. Для аппроксимации функции рассеяния точки объектов использовалась модель двумерного распределения Гаусса с пятью постоянными, вычисляемыми методом наименьших квадратов. В данной серии наблюдений метод обеспечил сходимость итераций для всех объектов, входящих в опорный каталог Gaia DR2 в поле зрения кадра.

7. Отождествление объектов с каталогом. Получение экваториальных координат спутника. Количество опорных объектов, соответствующее по каталогу полю зрения изображения — от сотни до двухсот звезд. Для получения постоянных кадра методом наименьших квадратов на основании

Таблица 1. Результаты наблюдений. Шкала времени UTC. Система координат экватора и равноденствия эпохи J2000. Номера спутников: 6 – J6 (Гималия), 8 – J8 (Пасифе)

Номер спутника	Дата, год, месяц, день	Момент наблюдения, ч, мин, с	Прямое восхождение, ч, мин, с	Склонение, град, угл. мин, угл. с
6	2017 06 13	18 58 24.690	12 52 36.0817	–4 25 0.0025
6	2017 06 13	19 03 49.440	12 52 36.0890	–4 25 0.2108
6	2017 06 13	19 09 19.810	12 52 36.0977	–4 25 0.4639
6	2017 06 13	19 14 45.130	12 52 36.1060	–4 25 0.6872
6	2017 06 13	19 24 10.660	12 52 36.1200	–4 25 1.0557
6	2017 06 13	19 29 45.610	12 52 36.1285	–4 25 1.3364
8	2017 05 30	18 58 24.690	12 55 40.4103	–3 37 10.4042
8	2017 05 30	19 03 49.440	12 55 40.3798	–3 37 10.2688
8	2017 06 13	19 39 28.197	12 55 34.3351	–3 37 51.7589
8	2017 06 13	19 44 55.098	12 55 34.3491	–3 37 51.8592
8	2017 06 13	19 50 22.399	12 55 34.3673	–3 37 52.0460
8	2017 06 13	19 55 49.937	12 55 34.3853	–3 37 52.1684
8	2017 06 13	20 10 29.980	12 55 34.4232	–3 37 52.4540
8	2017 06 13	20 15 54.786	12 55 34.4357	–3 37 52.6380
8	2017 06 13	20 21 20.983	12 55 34.4497	–3 37 52.7766
8	2017 06 26	18 52 27.621	12 57 22.6806	–3 51 4.1259
8	2017 06 26	18 57 52.911	12 57 22.7254	–3 51 4.4846
8	2017 06 26	19 03 19.198	12 57 22.7741	–3 51 4.7999
8	2017 06 26	19 18 44.823	12 57 22.9046	–3 51 5.7348
8	2017 06 26	19 25 19.883	12 57 22.9584	–3 51 6.1400
8	2017 06 26	19 30 44.980	12 57 23.0021	–3 51 6.4721
8	2017 06 26	19 36 09.787	12 57 23.0524	–3 51 6.8439
8	2017 06 27	20 34 57.173	12 57 36.3863	–3 52 40.3766
8	2017 06 27	20 40 22.800	12 57 36.4342	–3 52 40.7268
8	2017 06 28	18 48 05.253	12 57 48.8373	–3 54 7.3167
8	2017 06 28	18 53 29.893	12 57 48.8850	–3 54 7.6011
8	2017 06 28	18 58 55.717	12 57 48.9325	–3 54 8.0356
8	2017 06 28	19 05 13.340	12 57 48.9967	–3 54 8.4098
8	2017 06 28	19 12 13.418	12 57 49.0597	–3 54 8.7915
8	2017 06 28	19 18 55.583	12 57 49.1287	–3 54 9.3232
8	2017 06 30	19 54 24.217	12 58 18.1558	–3 57 31.1003
8	2017 06 30	19 59 49.402	12 58 18.2076	–3 57 31.4198
8	2017 06 30	20 05 17.646	12 58 18.2746	–3 57 31.9625

данных опорных звезд, отождествленных с каталогом, решалась система с десятью параметрами редукции.

Обрабатывались 29 снимков спутника J8 (Пасифе) и 9 снимков спутника J6 (Гималия). В результате обработки удачных снимков получены 33 положения спутников.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные астрометрические результаты помещены в табл. 1. Даны экваториальные координаты спутников в системе экватора и равноденствия эпохи J2000. Система координат соответствует использованному звездному каталогу. Шкала времени UTC.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ. СРАВНЕНИЕ С ЭФЕМЕРИДАМИ

Для проверки результатов наблюдений и оценки их точности использовались эфемериды спутников J6 Гималия и J8 Пасифе, полученные с помощью сервера эфемерид MULTI-SAT (Emel'yanov, Arlot, 2008). Модели движения этих спутников были также построены на основе наблюдений и опубликованы в работах (Jacobson, 2000; Jacobson и др., 2012; Brozovic, Jacobson, 2017). Эфемериды, вычисляемые по последним версиям этих моделей, можно получить с помощью сервера эфемерид JPL (Giorgini, Yeomans, Chamberlin, Chodas, 1997). Модели движения далеких спутников неоднократно уточнялись первым автором данной статьи на основе новых наблюдений. Модель движения спутника J6 (Гималия) к настоящему времени уточнена на основе 3381 наблюдения, выполненного на интервале времени с 3 января 1905 г. по 14 декабря 2016 г. (примерно 110 лет). Модель движения спутника J8 (Пасифе) — на основе 2943 наблюдения, выполненного на интервале времени с 20 января 1905 г. по 17 июня 2016 г. (примерно 110 лет). Средневзвешенные среднеквадратичные значения отклонений наблюденных положений от эфемерид по всем указанным наблюдениям оказались равными для спутника J6 (Гималия) $0.21''$, для спутника J8 (Пасифе) — $0.22''$. При этом точность эфемерид оценивается в сервере MULTI-SAT для 2017 г. величиной $0.008''$ для J6 (Гималия) и $0.05''$ для J8 (Пасифе). Результаты наблюдений, полученные в данной работе, для уточнения эфемерид еще не использовались.

Сравнение результатов наблюдений, выполненных в данной работе, с эфемеридами сделано сразу по всем 33 положениям двух спутников. Сравнение показало следующие оценки отклонений. Средние значения составили $0.036''$ по прямому восхождению и $0.044''$ по склонению. Среднеквадратичные величины отклонений: $0.085''$ по прямому восхождению и $0.064''$ по склонению. Дисперсии, т.е. среднеквадратичные величины отклонений от средних значений, составили: $0.077''$ по прямому восхождению и $0.047''$ по склонению. Сравнение было выполнено с помощью сервера эфемерид MULTI-SAT с использованием удобного сервиса сравнения результатов наблюдений с эфемеридами, предоставляемого системой MULTI-SAT (Emel'yanov, Arlot, 2008).

Следует отметить, что точность наблюдений далеких спутников больших планет в последние 15 лет стала заметно лучше. В частности, в работе (Khovritchev и др., 2015) опубликованы новые наблюдения четырех далеких спутников Юпитера.

Для большинства из этих наблюдений отличия наблюденных положений спутников от эфемерид не превышают $0.1''$.

Сопоставляя полученные оценки с точностью предшествующих наблюдений, мы делаем вывод, что качество выполненных в данной работе наблюдений соответствует современному уровню наземных наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На Кавказской горной обсерватории (КГО) Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова на новом телескопе с диаметром зеркала 2.5 м в 2017 г. были проведены астрометрические наблюдения далеких спутников Юпитера J6 (Гималия) и J8 (Пасифе). Получены 6 положений спутника J6 (Гималия) и 27 положений спутника J8 (Пасифе). Дисперсии, т.е. среднеквадратичные величины отклонений от средних значений, по всем 33 наблюдениям двух спутников составили: $0.077''$ по прямому восхождению и $0.047''$ по склонению. Эти оценки показывают, что наблюдения, выполненные на 2.5 м телескопе Кавказской горной обсерватории, позволяют получить точность, соответствующую современным требованиям к точности наземных астрометрических наблюдений объектов Солнечной системы.

Новые наблюдательные данные будут полезны для уточнения моделей движения далеких спутников Юпитера.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-52-150005. Наблюдательные данные получены с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Потанин С.А., Горбунов И.А., Додин А.В., Саввин А.Д., Сафонов Б.С., Шатский Н.И. Исследование оптики 2.5-метрового телескопа ГАИШ МГУ // Астрон. журн. 2017. Т. 94. С. 715.
- Andersen J. The Astronomical CCD Development Program at Copenhagen University // Proc. Conf. "Optical Detectors for Astronomy" Garching, Germany, October 8–10, 1996 / Eds Beletic J.W., Amico P. Boston, Mass.: Kluwer Acad. Publ., 1998.
- Arlot J.-E., Emelyanov N.V. The NSDB natural satellites astrometric database // Astron. and Astrophys. 2009.V. 503. P. 631–638.
- Brozovic M., Jacobson R.A. The orbits of Jupiter's irregular satellites // Astron. J. 2017. V. 153. Iss. 4. Article id. 147, 10 p.

- Emel'yanov N.V., Arlot J.-E.* The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 487. P. 759–765.
- Gaia Collaboration. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 616. Id.A1, 22 pp.
- Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N.* JPL's On-Line Solar System Data Service // *Amer. Astron. Soc. DPS meeting N. 28, April 25, 1997. Bull. Amer. Astron. Soc.* 1997. V. 28. P. 1158.
- Jacobson R.A.* The orbits of the outer Jovian satellites // *Astron. J.* 2000. V. 120. P. 2679–2686.
- Jacobson R., Brozovic M., Gladman B., Alexandersen M., Nicholson P.D., Veillet C.* Irregular satellites of the outer planets: orbital uncertainties and astrometric recoveries in 2009–2011 // *Astron. J.* 2012. 144: 132. 8 pp.
- Khovritchev M.Yu., Ershova A.P., Balyaev I.A., Bikulova D.A., Izmailov I.S., Roshchina E.A., Petjur V.V., Shumilov A.A., Maksimova L.A., Oskina K.I., Apetyan A.A., Kulikova A.M.* Astrometric observations of outer Jovian satellites with the “Saturn” telescope. First results // eprint arXiv:1511.01642. November 2015.