

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АСТЕРОИДА 2011 UW158

© 2016 г. А. В. Ипатов¹, Ю. С. Бондаренко^{1*}, Ю. Д. Медведев¹,
Н. А. Мишина¹, Д. А. Маршалов¹, Л. А. Беннер²

¹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург

²Лаборатория реактивного движения, Калифорнийский технологический институт

Поступила в редакцию 24.06.2016 г.

В июле 2015 г. были проведены межконтинентальные бистатистические радиолокационные наблюдения потенциально опасного астероида 2011 UW158 в период его тесного сближения с Землей. Облучение астероида проводилось на частоте 8.4 ГГц с 70-м антенной DSS-14 станции дальней космической связи Голдстоун, а прием отраженного от астероида сигнала осуществлялся 32-метровыми радиотелескопами РСДБ комплекса “Квазар-КВО” в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бадары”. Получены спектры отраженных радиосигналов. Определены размеры и период вращения астероида, которые соответствуют фотометрическим наблюдениям, а также отношения мощности отраженного сигнала с левой и правой круговой поляризации. Полученные значения свидетельствуют о том, что поверхность астероида неоднородна и имеет вытянутую форму. Получены наблюдения доплеровского смещения частоты отраженного сигнала, что позволило уточнить параметры орбиты астероида.

Ключевые слова: АСЗ, астероиды, радиолокационные наблюдения, определение орбиты.

DOI: 10.7868/S0320010816120020

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время радиолокация является одним из наиболее эффективных методов определения физических свойств астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Радиолокационные измерения позволяют определить размеры, форму, особенности вращения, исследовать свойства поверхности, а также уточнить элементы орбит АСЗ. В данной работе приведены результаты радиолокационных измерений и физические параметры потенциально опасного астероида 2011 UW158. Этот астероид был обнаружен 25 октября 2011 г. с помощью телескопа Pan-STARRS 1, расположенного на острове Мауи (США). На момент обнаружения его абсолютная звездная величина составляла 19.4^m, а предполагаемый диаметр оценивался в ~0.5 км. Позднее по фотометрическим наблюдениям был получен период вращения, который составил 37 мин. Амплитуда световой кривой соответствовала 0.7 звездной величины; абсолютная звездная величина 20 (Гэри, 2016). 19 июля 2015 г. астероид приблизился к Земле на минимальное расстояние в 0.0164 а.е. или приблизительно на 6 расстояний от Земли до Луны.

Институтом прикладной астрономии совместно с обсерваторией Голдстоун были проведены меж-

континентальные радиолокационные наблюдения астероида 2011 UW158. Такой способ проведения радиолокационных наблюдений получил название “бистатистический”. Этот способ позволяет непрерывно наблюдать быстро вращающиеся небесные тела, а в случае интерферометрического приема — определять направление вращения и точные координаты исследуемого объекта.

НАБЛЮДЕНИЕ И ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились 18 июля 2015 г. с 20:25 по 21:00 UT. В это время 70-м антенна станции дальней космической связи (DSS-14) облучала астероид радиосигналом на частоте 8560 МГц (3.5 см) в правой круговой поляризации. Отраженный от астероида сигнал принимался 32-м радиотелескопами (РТ-32) Российской РСДБ сети “Квазар-КВО” (Ипатов, 2014) в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бадары” в левой и правой круговых поляризациях одновременно. Наблюдения астероида в обсерватории “Бадары” проводились на углах места ~10° при шумовой температуре радиотелескопа 40 К. В обсерватории “Зеленчукская” угол места составлял ~30°, а шумовая температура 55 К. Коэффициенты использования поверхности (КИП) радиотелескопов РТ-32 при

*Электронный адрес: bondarenko@ipa.nw.ru

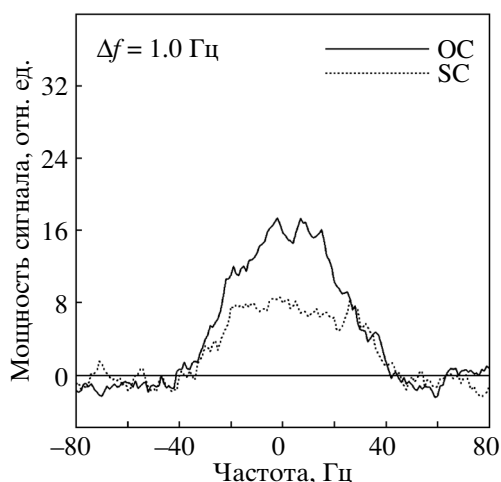


Рис. 1. Спектры отраженного сигнала SC (правая поляризация) и OC (левая поляризация), полученные в обсерватории Зеленчукская.

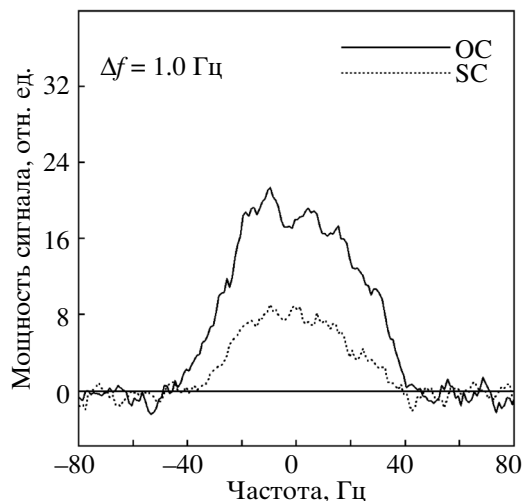


Рис. 2. Спектры отраженного сигнала SC (правая поляризация) и OC (левая поляризация), полученные в обсерватории Бадары.

таких углах места равны 0.54 и 0.48 соответственно. Доплеровское смещение частот отраженных сигналов на начало наблюдений оценивалось в 58 и 55 кГц, а их изменения на всем интервале наблюдений достигали 1.8 и 1 кГц в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бадары” соответственно. Уширение спектра отраженного сигнала для обеих станций составило порядка 100 Гц. Регистрация сигнала проводилась в минимальной полосе 0.5 МГц системы преобразования сигнала (СПС) P1002M (Гренков и др., 2010), что гарантировало нахождение принятого сигнала в заданной полосе частот. Принятый сигнал был квантован и записан в цифровом формате на модули Mark5B. Далее, используя быстрое преобразование Фурье, по полученным измерениям, с учетом доплеровского смещения частоты были вычислены спектры сигналов на односекундных интервалах с частотным разрешением 1 Гц. В дальнейшем полученные спектры суммировались для каждой станции отдельно.

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Спектры отраженных от астероида 2011 UW158 сигналов, полученные в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бадары”, на всем интервале наблюдения приведены на рис. 1 и 2 соответственно. По оси ординат отложена мощность спектра, выраженная в единицах стандартного отклонения среднего уровня шума, а по оси абсцисс — частота в Гц. Сплошными и пунктирными линиями изображены спектры отраженного сигнала с левой и правой

круговыми поляризациями соответственно. Отношение сигнал—шум (С/Ш) определялось как отношение среднего арифметического значений амплитуды принятого сигнала к среднеквадратическому отклонению шума и составило для левой поляризации в обсерватории “Бадары” 191 и 178 в обсерватории “Зеленчукская”. Эти величины позволили оценить плотность потока отраженного сигнала в 21 и 19 Ян. Различие отношений С/Ш для разных обсерваторий связано с собственными шумовыми температурами систем, а также условиями наблюдений.

Обозначим круговую поляризацию принятого радиосигнала, совпадающую с круговой поляризацией излученного сигнала как SC, а обратную — OC. В нашем случае SC соответствует правой круговой поляризации, а OC — левой. Круговая поляризация сигнала, после отражения от плоской поверхности меняется на противоположную, поэтому наибольшая мощность отраженного сигнала принимается в OC. Сигнал с SC наблюдается вследствие многократных отражений от неровностей на поверхности астероида. Таким образом, величина отношения уровней сигнала OC к SC определяет неровность поверхности. Эта величина μ_C (коэффициент круговой поляризации) в нашем случае равна $\mu_C = 0.56 \pm 0.06$ для обсерватории “Зеленчукская” и $\mu_C = 0.37 \pm 0.04$ для обсерватории “Бадары”. Отличие шумовых температур примерно в 1.5 раза между правым и левым приемными каналами РТ-32 в обсерватории “Зеленчукская” объясняет разницу полученных значений μ_C . С учетом этого полученные значения близки к средним значениям $\mu_C = 0.34 \pm 0.25$ большинства АСЗ, т.е.

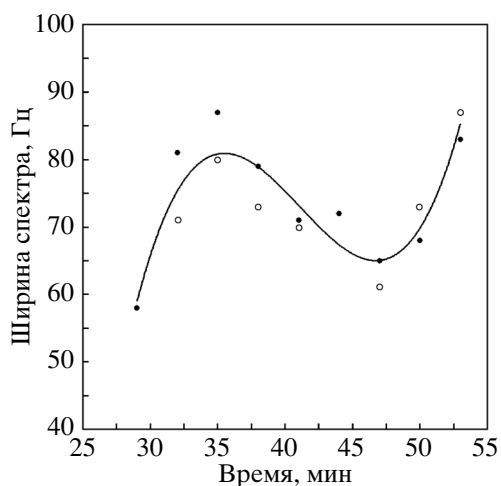


Рис. 3. Изменение ширины спектров мощности отраженного сигнала со временем.

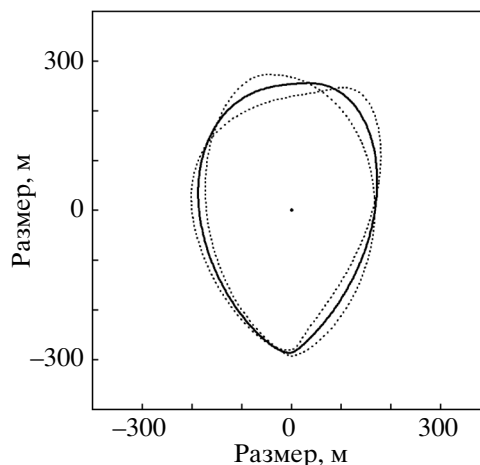


Рис. 4. Средняя фигуры астероида в проекции на его экваториальную плоскость.

неровность поверхности астероида 2011 UW158 на сантиметровых масштабах соответствует большинству астероидов (Беннер и др., 2008).

ПЕРИОД ВРАЩЕНИЯ И ФОРМА АСТЕРОИДА

Для каждой обсерватории была получена серия из девяти спектров мощности отраженного сигнала с 30° шагом фазы вращения астероида и накоплением 200 с, дающие отношения С/Ш ~ 70 . Эти спектры в обеих поляризациях на соответствующие моменты времени в одинаковом масштабе представлены ниже на рис. 5 и 6 для обсерваторий Бадары (Серия 1) и Зеленчукская (Серия 2). По осям отложены мощность и частота. Ширины спектральных профилей приведены на рис. 3. Черными точками отмечены значения ширины спектра для обсерватории «Зеленчукская», а белыми точками — для обсерватории «Бадары» на соответствующие моменты времени. Отсчет начинается с $20^{\text{h}} 00^{\text{m}} 18$ июля 2015 г. Ширина профиля линии определяется вращением отражающей поверхности астероида, а ее изменение свидетельствует об асимметрии формы.

Методом наименьших квадратов по всем имеющимся значениям ширины была найдена осредняющая функция, которая изображена на рис. 3 черной линией. Она позволила нам оценить период вращения астероида P , который оказался равным 36 ± 3 мин. Это значение согласуется с периодом в 37 мин, полученным ранее по световым кривым. Такое быстрое вращение предполагает, что астероид 2011 UW158 обладает высокой механической прочностью, являясь единым монолитным телом.

Большинство известных астероидов имеют период вращения более двух часов, при котором объекты, состоящие из рыхлых конгломераций обломков, не распадаются.

Исходя из полученного значения периода вращения астероида и ширины спектрального профиля, были определены размеры отражающей мишени в экваториальной плоскости. Изменение размеров сечения со временем представлялось периодической функцией (Остро и др., 1990). Разлагая эту функцию в ряд Фурье до членов третьего порядка включительно, мы получили двумерную выпуклую фигуру, которая представляет собой проекцию астероида на его экваториальную плоскость. Предполагалось, что угол между осью вращения астероида и лучом зрения равен 90° . Пунктирными линиями на рис. 4. изображены фигуры, полученные для каждой из обсерваторий в отдельности, а сплошной линией — общее решение для двух обсерваторий. Земля находится в нижней части рис. 4, т.е. луч зрения направлен параллельно оси ординат, а фигура вращается по часовой стрелке относительно центра масс. Из рисунка видно, что астероид представляет собой тело вытянутой формы. Его размеры варьируются от 350 до 520 м, и согласуются с радарными наблюдениями обсерваторий Аресибо, Голдстоун и Грин Банк (Найду и др., 2015).

На рис. 5 и 6 полученная фигура изображена над спектрами в том же линейном масштабе с 30° шагом фазы вращения. В правом верхнем углу указано время в часах и минутах, что позволяет судить об ориентации астероида в эти моменты времени. Следует обратить внимание на характер изменения формы спектра в зависимости от фазы вращения на обоих рисунках. Форма спектра соответствует

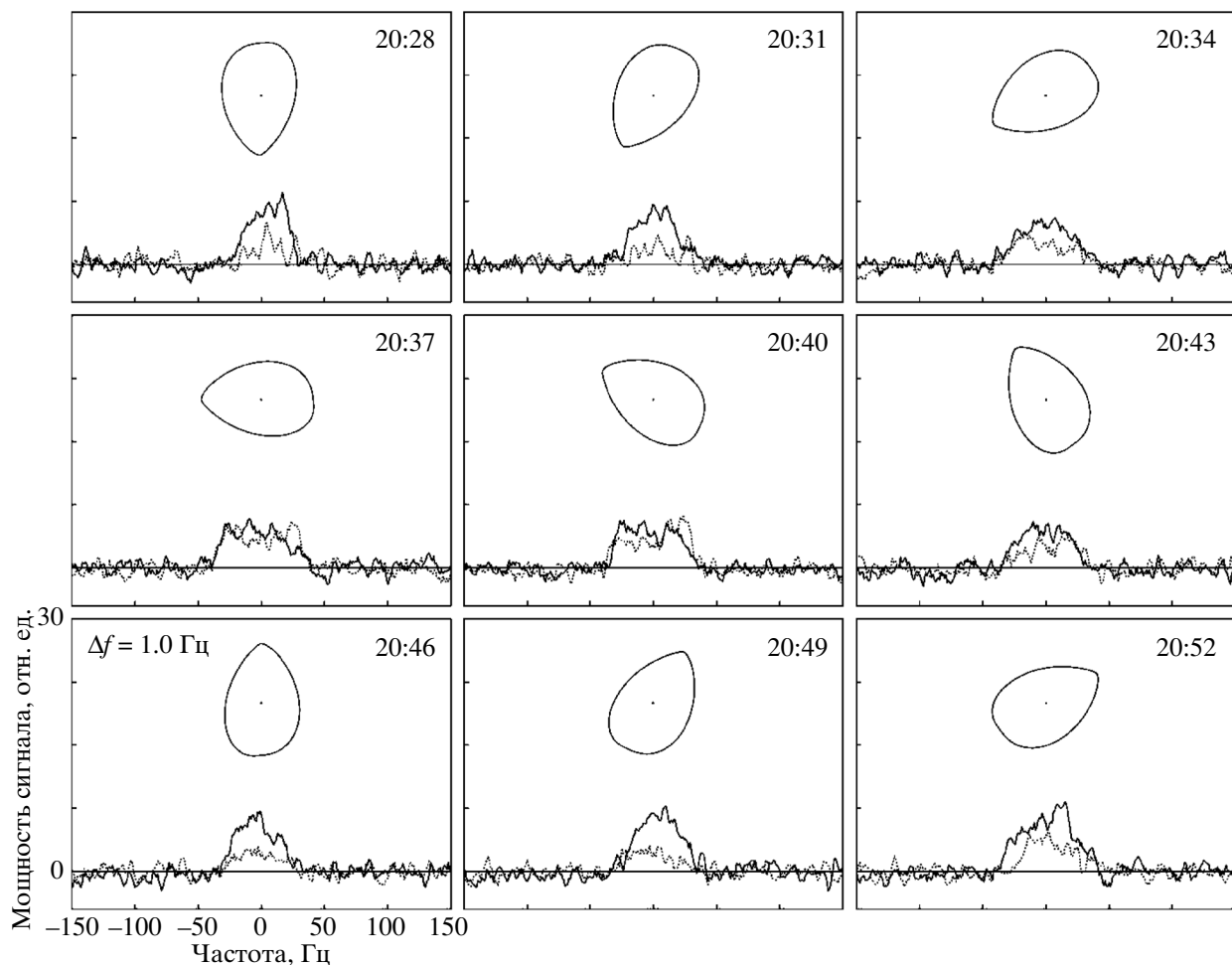


Рис. 5. Серия спектров отраженного сигнала и фигура астероида в соответствующей фазе вращения для обсерватории Зеленчукская.

ориентации астероида. Плавные края характерны рассеиванию сигнала в направлении луча зрения, в то время как пологий участок спектра с резким

падением сигнала к краям говорит о том, что тело повернулось к наблюдателю поверхностью с меньшей кривизной. Видно, что характер изменения формы спектра повторяется на двух независимых станциях, что свидетельствует о высокой точности измерений.

Таблица 1. Орбитальные элементы астероида 2011 UW158 на 27 июня 2015 г.

Величина	Значение	Ошибка
Средняя аномалия (°)	349.64421188	2.3×10^{-7}
Аргумент перигелия (°)	8.64720924	6.0×10^{-7}
Долгота восходящего узла (°)	286.27292520	3.5×10^{-7}
Наклон (°)	4.6498398	1.3×10^{-7}
Эксцентриситет	0.37513083172	7.9×10^{-10}
Среднее движение (°/сут)	0.47926460702	7.6×10^{-10}

УТОЧНЕНИЕ ОРБИТЫ

Для уточнения параметров орбиты были определены доплеровские смещения в спектрах, значения которых приведены в табл. 2. Для оценки точности полученных наблюдений доплеровского смещения была определена орбита астероида. При вычислении орбиты использовались 911 позиционных наблюдений и 8 наблюдений задержки радиосигнала с октября 2011 г. по ноябрь 2015 г., взятых из базы данных наблюдений Центра малых планет, а также 18 наших наблюдений доплеровского

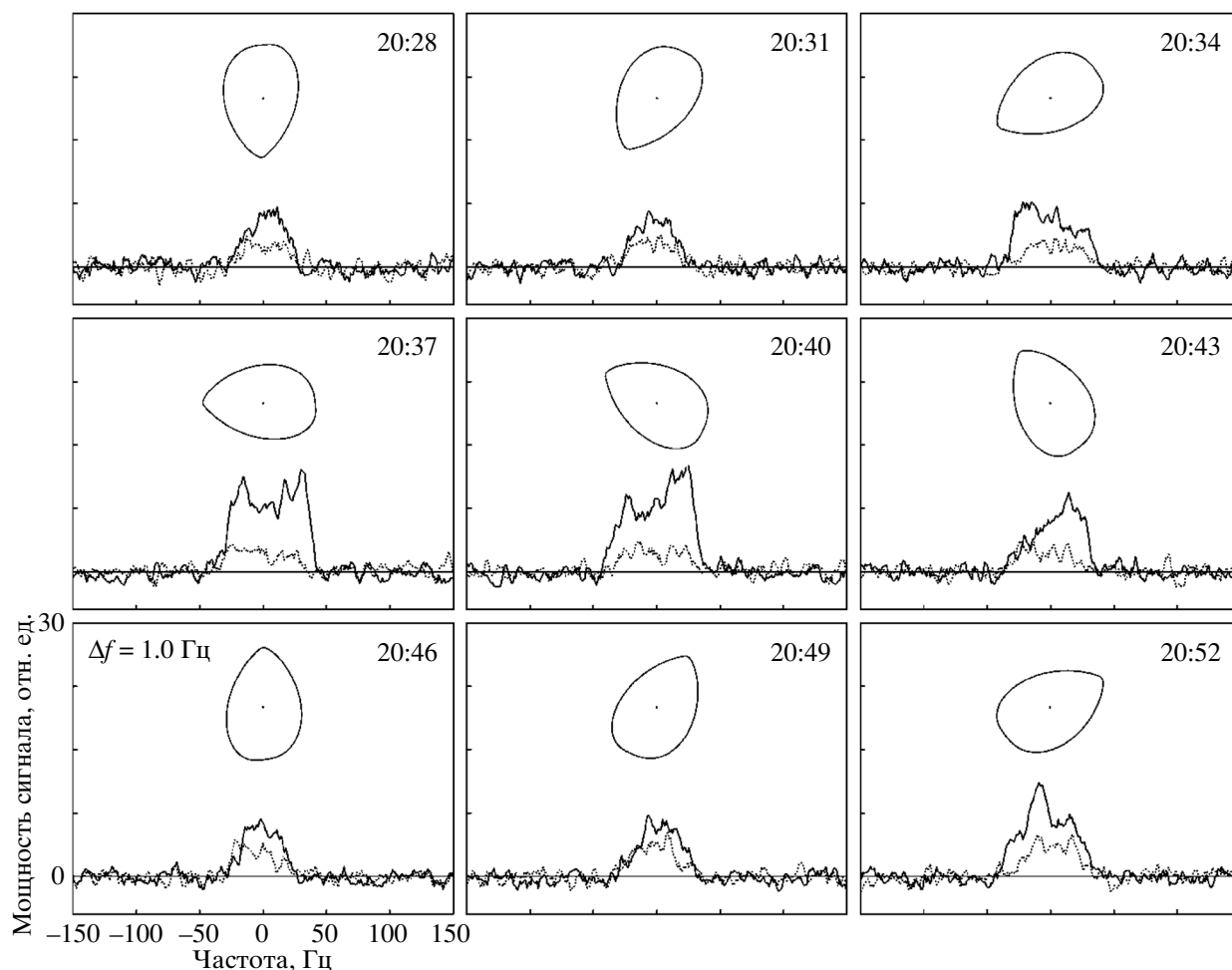


Рис. 6. Серия спектров отраженного сигнала и фигура астероида в соответствующей фазе вращения для обсерватории Бадары.

смещения. В табл. 1 представлены гелиоцентрические элементы орбиты астероида 2011 UW158, вычисленные на эпоху 27 июня 2015 г. со среднеквадратической ошибкой $\sigma = 0.29''$ (Бондаренко и др., 2014). Минимальное расстояние между орбитами астероида и Земли составляет 0.0026 а.е., что позволяет отнести астероид 2011 UW158 к классу потенциально опасных астероидов.

Разности между наблюдаемыми и вычисленными ($O-C$) значениями для наблюдений доплеровского смещения представлены в табл. 1. Среднеквадратическая ошибка полученных наблюдений равна 4 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиолокационный сигнал, переданный на частоте 8.4 ГГц с 70-м антенны станции дальней космической связи Голдстоун и отраженный от асте-

роида 2011 UW158, был успешно принят 32-м радиотелескопами в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бадары”. В результате обработки принятого сигнала были получены 9 наблюдений доплеровского смещения для каждой из обсерваторий. Установлены эффективная форма астероида 350×520 м, период его вращения 36 ± 3 мин и направление вращения. Определено, что астероид обладает высокой механической прочностью, представляя собой единое монолитное тело, а шероховатость поверхности имеет сантиметровые масштабы. Полученные результаты подтверждают эффективность проведения бистатистических радиолокационных наблюдений на базе радиотелескопов РСДБ сети “Квазар” в качестве приемных антенн и дают возможность развивать данное направление исследований с применением метода радиоинтерферометрии.

Таблица 2. Наблюдения доплеровского смещения частоты отраженного сигнала

Эпоха (UT) 2015-08-18	Зеленчукская		Бадары	
	Доплер (Гц)	$O-C$ (Гц)	Доплер (Гц)	$O-C$ (Гц)
20:28	54903	-11	58479	-8
20:31	54727	-6	58367	-3
20:34	54550	-3	58246	-7
20:37	54373	1	58135	1
20:40	54190	-2	58016	1
20:43	54011	0	57905	9
20:46	53832	2	57783	7
20:49	53643	-6	57654	0
20:52	53463	-6	57525	-7

Работа проведена при поддержке Российского научного фонда (грант 16-12-00071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беннер и др. (L.A.M. Benner, S.J. Ostro, C. Magri, M.C. Nolan, E.S. Howell, J.D. Giorgini, J.L. Margot, M.W. Busch, M.K. Shepard, P.A. Taylor, and R.F. Jurgens), *Icarus* **198**, 294 (2008).
2. Бондаренко Ю.С., Вавилов Д.Е., Медведев Ю.Д., *Астрон. вестник* **48**, 229 (2014) [Yu. Bondarenko, D. Vavilov, Yu. Medvedev, *Solar Sys. Res.* **48**, 212 (2014)].
3. Гренков С.А., Носов Е.В., Федотов Л.В., Кольцов Н.Е., *Приборы и техн. эксп.* **5**, 60 (2010) [S.A. Grenkov, E.V. Nosov, L.V. Fedotov, N.E. Koltsov, *Instr. Exp. Tech.* **53**, 675 (2010)].
4. Гэри (S.L. Gary), *Minor Planet Bull.* **43**, 33 (2016).
5. Ипатов и др. (A. Ipatov, I. Gayazov, S. Smolentsev, D. Ivanov, G. Ilin, N. Shuygina and Yu. Bondarenko), *Proceed. of the 8th IVS General Meeting* (Science Press, Beijing, China, 2014), p. 173.
6. Найдю и др. (Sh.P. Naidu, L.A.M. Benner, M. Brozovic, J.D. Giorgini, J.S. Jao, M.W. Busch, P.A. Taylor, J.E. Richardson, et al.), *DPS meeting 47, Book of Abstracts* (2015).
7. Остро и др. (S.J. Ostro, K.D. Rosema, and R.F. Jurgens), *Icarus* **84**, 334 (1990).