

О ПОИСКЕ КВАЗИСПУТНИКОВ ПЛАНЕТ

*А. В. Девяткин, В. Н. Львов, С. Д. Цекмейстер,
О. О. Василькова, С. С. Смирнов*

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Российская Федерация, 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65/1

В настоящее время все большее внимание уделяется изучению квазиспутников Земли и других планет. Это обусловлено тем, что в ряде случаев такие объекты могут представлять потенциальную угрозу столкновения с планетой. С другой стороны, квазиспутники Земли могут рассматриваться как объекты, которые можно перевести на околоземные или окололунные орбиты с целью их детального изучения и использования в качестве источника минеральных ресурсов. Поэтому полезно знать множество указанных и близких к ним объектов. В настоящей работе предложен алгоритм поиска квазиспутников планет на текущий момент. Представлены списки таких объектов. Отмечены некоторые особенности их движения. Библиогр. 6 назв. Ил. 2. Табл. 1.

Ключевые слова: астероиды, резонанс 1:1, квазиспутники.

Введение. Астероиды, движущиеся вблизи резонанса 1:1 по среднему движению с планетой, удобно изучать во вращающейся системе координат, начало которой совпадает с центром Солнца, а ось абсцисс проходит через центр планеты. В этой системе их можно подразделить на 4 типа: циркулирующие объекты, объекты на подковообразных орбитах (HS), троянцы и квазиспутники (QS). Циркулирующий объект либо опережает планету, либо отстает от нее по долготе, в зависимости от соотношения их средних движений. На подковообразной орбите астероид может приблизиться к планете с одной стороны, затем двинуться в противоположную сторону по долготе с тем, чтобы через некоторое время сблизиться с планетой с другой стороны. После нескольких таких «качаний» объект может перейти на квазиспутниковую или циркулирующую орбиту. Движение троянцев в окрестности лагранжевых точек либрации L4 и L5 планеты может быть устойчиво на длительных интервалах времени. Наконец, квазиспутник [1–3] — это астероид, движущийся по гелиоцентрической орбите и имеющий при этом величины среднего движения и средней долготы близкие к подобным величинам у планеты. В проекции на эклиптику циркулирующие астероиды и квазиспутники описывают вытянутые ретроградные петли вокруг планеты. Эти петли (см. рис. 1) по форме могут походить на эллипс (2004 GU9), банан (2001 QL142, 2000 EE104), восьмерку (2005 QQ87) либо напоминать цепочки различного рода (2008 UC202).

Квазиспутники могут находиться в окрестности планеты на протяжении многих периодов ее обращения вокруг Солнца, при этом либрируя по долготе [4]. Со временем они покидают окрестности планеты, переходя на подковообразную или циркулирующую орбиту, но в будущем могут снова на некоторое время стать квазиспутниками.

В ряде случаев квазиспутники при выходе из QS-режима движения могут испытывать тесные сближения с планетой и становиться для нее потенциально опасными объектами, как, впрочем, и некоторые циркулирующие астероиды. В качестве примера назовем астероид Duende (2012 DA14), который 15 февраля 2013 года прошел на расстоянии около 34 тыс. км от Земли. В результате его орбита претерпела существенные изменения. На рис. 2 представлено движение этого объекта во вращающейся системе координат. Цифрами помечены различные этапы: 1–2 — петли охватывают Землю; 2 — тесное сближение с Землей; 2–3 — движение по циркулирующей орбите.

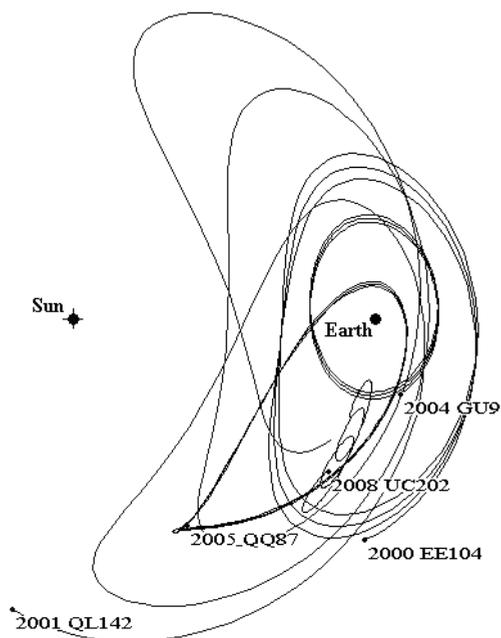


Рис. 1. Различные виды петель.

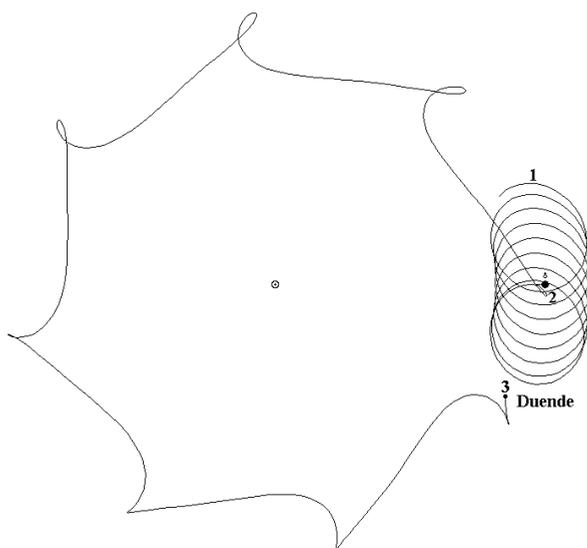


Рис. 2. Движение астероида Duende.

Об алгоритме поиска. Итак, мы отметили, что некоторые из упомянутых объектов могут представлять потенциальную угрозу столкновения с Землей. С другой стороны, их можно рассматривать как цель для перевода астероидов на околоземные или окололунные орбиты с последующим их детальным изучением и использовани-

ем в качестве источника сырьевых ресурсов. Поэтому поиск таких объектов, помимо всего прочего, имеет вполне обоснованную практическую ценность.

В настоящее время с помощью пакета программ ЭПОС [5] на основе численного интегрирования уравнений возмущенного движения можно найти среди множества всех известных астероидов квазиспутники планет и получить графическое воспроизведение их движения во вращающейся системе координат на длительных интервалах времени. При этом используется «длинная» численная эфемерида Солнца и планет JPL DE431¹.

Первым этапом поиска является выявление объектов, которые при своем движении от текущей эпохи образуют хотя бы одну петлю вокруг планеты во вращающейся системе координат. Очевидно, что астероиды, движущиеся вблизи резонанса 1:1 по среднему движению с Землей, имеют тем большее максимальное удаление от нее за период обращения, чем более отличается эксцентриситет их орбиты от земного. А это должно влиять на размеры петли. Для таких объектов была найдена приближенная зависимость размаха петли в градусах Δl по долготе от разности эксцентриситетов, которую в первом приближении можно описать формулой

$$\Delta l = c |e - e_0|, \quad (1)$$

где $c \approx 255^\circ$, e , e_0 — соответственно эксцентриситеты орбит астероида и планеты. Таким образом, долгота искомого объекта должна отличаться от земной не более, чем на величину Δl формулы (1). На самом деле это соотношение в целом подходит и для других планет.

Пусть средние долготы планеты и астероида на эпоху элементов каталога равны соответственно λ_0 и λ . Тогда неравенство

$$|\lambda - \lambda_0| \geq \Delta l$$

исключает объект из числа искомым. Но и противоположное неравенство не гарантирует принадлежности объекта к ним. Поэтому дополнительным критерием является **двукратная смена знака разности эклиптических долгот при разных знаках разности гелиоцентрических расстояний астероида и планеты за период обращения астероида вокруг Солнца.**

При этом полезно ввести следующие ограничения: эксцентриситет и наклон орбиты объекта не должны превышать соответственно величин 0,5 и 45° , а среднее движение должно отличаться от планетного не более чем на $\pm 1/40$ величины среднего движения планеты (для Земли на текущую эпоху это составит $3543 \pm 89''$). Тем самым выбираются объекты, которые не выходят далеко за пределы резонанса 1:1 и не порождают слишком широких петель. Впрочем, программные средства позволяют варьировать упомянутые ограничения.

Результаты. Еще раз отметим, что поиск квазиспутников производится вблизи от текущей эпохи каталога элементов астероида. Мониторинг таких объектов для отдаленных моментов времени возможен, но для этого требуются более значительные вычислительные ресурсы. С переходом к другой эпохе элементов, а также с уточнением орбит известных объектов и с открытием новых объектов списки, приведенные ниже, могут быть подвержены ревизии. Это может коснуться и самого характера движения, и его временных границ.

¹<ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/ascii>

Вот, например, список астероидов из каталога MPCORB² по состоянию на 19 сентября 2014 г., которые образуют не менее 5 петель вокруг Земли: 2000 EE104, 2000 WN10, 2005 QQ87, 2005 TC51, 2007 DM8, 2008 NP3, 2008 UB95, 2008 WM64, 2009 PC, 2010 AO2, 2010 CO1, 2011 EC12, 2011 KR12, 2012 UV136, 2012 XJ16, 2013 AF69, 2013 BZ45, 2013 WR45, 2013 YT102, 2014 DH, 2014 GC35, 2014 KQ76, 2014 ON344. Все эти астероиды в настоящее время являются циркулирующими объектами.

В таблице отдельно перечислены выявленные на текущий момент квазиспутники Земли. Приведены имя (предварительное обозначение) объекта, интервал ΔT времени движения в QS-режиме, абсолютная звездная величина H и элементы орбиты: наклон i (в градусах), эксцентриситет e , большая полуось a в а. е., средняя аномалия M , аргумент перигелия ω и долгота восходящего узла Ω (последние три величины в градусах).

Квазиспутники Земли на эпоху JD2457000,5

Имя	ΔT	H	i	e	a	M	ω	Ω
1998 UP1	1914–2067	20,5	33,180	0,3450	0,9982	158,549	234,293	18,363
2004 GU9	~ 1 тыс. лет	21,1	13,648	0,1363	1,0013	121,354	280,333	38,688
2006 FV35	> 15 тыс. лет	21,7	7,102	0,3775	1,0013	102,136	170,846	179,542
2009 HE60	1945–2035	25,6	1,587	0,2652	0,9962	331,785	219,991	229,064
2014 OL339	~ 1 тыс. лет	22,8	10,190	0,4606	0,9990	215,719	289,655	252,229

В таблицу не включен недавний квазиспутник — астероид 2003 YN107 (1998–2006), который сейчас движется по подковообразной орбите, а после очередного сближения с Землей около 2300 года перейдет на циркулирующую орбиту.

Далее приведены подобные списки квазиспутников остальных планет, в скобках даны упомянутые выше временные интервалы:

Венера ($5624'' < n < 5912''$): 2001 СК32 (1987–2080), 2002 VE68 (более 6 тыс. лет), 2007 BD, 2013 VV13;

Марс ($1840'' < n < 1934''$): 1999 CQ2, 2001 HW15, 2001 QF96, 2001 QH142, 2002 BM5, 2003 AS42, 2003 CC, 2003 KW16, 2005 EU2, 2005 XX77, 2006 CF10 (более 9 тыс. лет), 2006 CU, 2006 FL10, 2009 UE2, 2009 UP1, 2009 VA26, 2009 VO24, 2010 AR1 (1986–2117), 2010 BB3, 2010 CN1, 2010 CN141, 2010 DE2, 2010 EZ45, 2010 FA10, 2010 FQ, 2011 SB25, 2011 UB276, 2012 AW10, 2012 BC62 (более 2 тыс. лет), 2012 BF77, 2012 BV61, 2012 DV32, 2012 EN10, 2012 FF, 2012 ML6, 2013 QN11, 2013 WU44, 2013 YM70, 2014 BK25, 2014 DG6, 2014 EB49, 2014 GF50, 2014 HD124, 2014 HP184, 2014 HP2, 2014 HU46, 2014 JU24, 2014 MM27;

Юпитер ($284'' < n < 314''$): 2002 CU147, 2010 HV45 (2013–2233), 2010 MF61 (1885–2076), 2010 MJ72, 2010 NA28 (1875–2110);

Сатурн ($114'' < n < 127''$): 2001 BL41, 2014 FU61;

Уран ($40'' < n < 44''$): 2002 VG131 (более 11 тыс. лет);

Нептун ($21'' < n < 23''$): 2007 RW10 (более 20 тыс. лет).

Отметим некоторые любопытные особенности движения квазиспутников.

Квазиспутник Венеры 2002 VE68 со временем переходит на орбиту троянца [6] и находится в этом режиме движения длительное время.

²<http://www.minorplanetcenter.org/iau/MPCORB.htm>

Квазиспутник Марса 2010 AR1 впоследствии продемонстрирует все перечисленные типы движения и даже около трехсот лет будет двигаться в окрестности точки либрации L3.

Астероид 2001 QQ199 на протяжении длительного времени совершает переходы с подковообразной орбиты на орбиту троянца Юпитера и обратно. Однако его орбита в целом является зеркальным отражением общепринятой HS-орбиты.

Астероид 2004 AE9, орбита которого лежит практически в плоскости эклиптики, из-за большого эксцентриситета (0,65) описывает широкие петли вокруг Юпитера на протяжении почти 18 тысяч лет. Поэтому его также можно считать квазиспутником, хотя он и не попал в список с вышеозначенными ограничениями.

Для внешних планет большинство объектов, движущихся в режиме квазиспутника, проявляют склонность к довольно значительной эволюции орбит.

Любопытно, что средний размер квазиспутников в соответствии с абсолютной звездной величиной монотонно возрастает с увеличением большой полуоси орбиты планеты. Возможно, этот факт хотя бы частично объясняется эффектом селекции.

Что касается карликовых планет, то и для них можно найти астероиды, движущиеся в соответствии с классическим определением квазиспутника. Однако здесь прослеживаются дополнительные особенности. Так, у Плутона появляются объекты с прямым (!) движением в петле (1994 JR1, 1995 KK1, 1996 KX1, 1996 KY1, 2001 KD77, 2003 LF7, 2004 HX78). А у Цереры в целом циркулирующие объекты могут порождать петли с либрацией всего в несколько оборотов (Yeomans, Debussy, Majoni, Amysimon и др.). Для карликовой планеты Хаумеа с некоторыми оговорками можно назвать одного претендента в квазиспутники — астероид 2009 KU36. Для остальных карликовых планет (Eris, Makemake) квазиспутники пока не обнаружены.

Поскольку орбиты большинства объектов из вышеприведенных списков известны с недостаточной точностью, то требуются дополнительные наблюдения. Программа астрометрических и фотометрических наблюдений квазиспутников начата на телескопах Пулковской обсерватории. Однако из-за слабого блеска большинства таких объектов планируется привлечь к этой наблюдательной программе и более крупные инструменты.

Авторы выражают благодарность В. В. Куприянову и В. В. Пашкевичу за полезные замечания.

Литература

1. *Лидов М. Л., Вашковъяк М. А.* О квазиспутниковых орбитах в ограниченной эллиптической задаче трех тел // Письма в АЖ. 1994. Т. 20, № 10. С. 781–795.
2. *Mikkola S., Innanen K., Wiegert P., Connors M., Brassier R.* Stability limits for the quasi-satellite orbit // MNRAS. 2006. Vol. 369. P. 15–24.
3. *Sidorenko Vladislav V., Neishtadt Anatoly I., Artemyev Anton V., Zelenyi Lev M.* Quasi-satellite orbits in the general context of dynamics in the 1:1 mean motion resonance: perturbative treatment // Celest. Mech. Dyn. Astr. 2014. Vol. 120, N 2. P. 131–162.
4. *Коган А. Ю.* Далекие спутниковые орбиты в ограниченной круговой задаче трех тел // Космич. Исслед. 1988. Т. 26, № 6. С. 813–818.
5. *Львов В. Н., Цекмейстер С. Д.* Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // Астрон. вестник. 2012. Т. 46, № 2. С. 177–179.
6. *Василькова О. О., Львов В. Н., Смирнов С. С., Цекмейстер С. Д.* Объекты Солнечной системы в резонансе 1:1 // Изв. ГАО РАН. 2012. № 220. С. 185–188.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2015 г.

Сведения об авторах

Десяткин Александр Вячеславович — доктор физико-математических наук, зам. директора; adev@gao.spb.ru

Львов Виктор Николаевич — кандидат физико-математических наук, зав. сектором эфемеридного обеспечения; epos-gao@mail.ru

Цекмейстер Светлана Дмитриевна — старший научный сотрудник сектора эфемеридного обеспечения; sdc-gao@mail.ru

Василькова Ольга Олеговна — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник сектора эфемеридного обеспечения; olyaov@mail.ru

Смирнов Сергей Сергеевич — научный сотрудник; smi@gao.spb.ru

ON A SEARCH OF PLANETS' QUASI-SATELLITES

Alexander V. Devyatkin, Viktor N. L'vov, Svetlana D. Tsekmeister, Olga O. Vasilkova, Sergei S. Smirnov
Pulkovo Observatory of RAS, Pulkovskoe chaussee, 65/1, St.Petersburg, 196140, Russian Federation;
adev@gao.spb.ru, epos-gao@mail.ru, sdc-gao@mail.ru, olyaov@mail.ru, smi@gao.spb.ru

Currently a growing attention is paid to research of quasi-satellites of the Earth and other planets. It is determined by the fact that in some cases such objects may represent a potential hazard of collision with a planet. On the other hand the quasi-satellites being transported to near-Earth or near-lunar orbits may be investigated in detail and used for mining of mineral resources. So it is useful to know a multitude of the mentioned and close to them objects. At present paper the algorithm is proposed for searching quasi-satellites of planets at a current epoch. The lists of these objects are represented. Some peculiarities of their motion are highlighted. Refs 6. Figs 2. Tables 1.

Keywords: asteroids, resonance 1 : 1, quasi-satellites.

References

1. Lidov M. L., Vashkov'yak M. A., "On Quasi-Satellite Orbits in Finite Elliptic Three-Body Problem", *Pis'ma v AJ* **20**(10), 781–795 (1994) [in Russian].
2. Mikkola S., Innanen K., Wiegert P., Connors M., Brassier R., "Stability limits for the quasi-satellite orbit", *MNRAS* **369**, 15–24 (2006).
3. Sidorenko V. V., Neishtadt A. I., Artemyev A. V., Zelenyi L. M., "Quasi-satellite orbits in the general context of dynamics in the 1:1 mean motion resonance: perturbative treatment", *Celest. Mech. Dyn. Astr.* **120**(2), 131–162 (2014).
4. Kogan A. Yu., "Remote Satellite Orbits in Finite Circular Three-Body Problem", *Kosmich. Issled.* **26**(6), 813–818 (1988) [in Russian].
5. L'vov V. N., Tsekmeister S. D., "The Use of the EPOS Software Package for Research of the Solar System Objects", *Astron. Vestnik* **46**(2), 177–179 (2012) [in Russian].
6. Vasilkova O. O., L'vov V. N., Smirnov S. S., Tsekmeister S. D., "The Objects of the Solar System in 1:1 Resonance", *Izv. GAO RAN* **220**, 185–188 (2012) [in Russian].