

УДК 523.44

ВЛИЯНИЕ YORP-ЭФФЕКТА НА ОСЕВОЕ ВРАЩЕНИЕ МАЛЫХ АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА

© 2019 г. Д. Ф. Лупишко^а, *, О. И. Михальченко^а, В. Г. Черный^а

^аНИИ астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

*e-mail: lupishko@astron.kharkov.ua

Поступила в редакцию 15.11.2018 г.

После доработки 08.01.2019 г.

Принята к публикации 08.01.2019 г.

Анализируется распределение по скоростям вращения малых астероидов ($D = 3\text{--}15$ км) главного пояса с точки зрения возможного влияния на их вращение солнечного излучения (YORP-эффекта). Показано, что эволюция распределения с возрастанием гелиоцентрического расстояния, а именно наличие ярко выраженных избытков быстрого и медленного вращения во внутренней части пояса, которые менее выражены в средней части и практически отсутствуют во внешней, хорошо согласуется с действием именно YORP-эффекта. Воздействие этого эффекта на объекты данной популяции довольно слабо по сравнению с воздействием на астероиды, сближающиеся с Землей (последние в среднем примерно в 3–4 раза меньше в размерах и подвержены примерно в три раза большей инсоляции), однако достаточное, чтобы его уверенно интерпретировать по имеющимся наблюдательным данным.

Ключевые слова: астероиды, малые астероиды, главный пояс астероидов, осевое вращение, распределение по скоростям вращения, YORP-эффект, средняя инсоляция

DOI: 10.1134/S0320930X19030046

ВВЕДЕНИЕ

Как уже отмечалось (Pravec, Harris, 2000; Lupishko, Tielieusova, 2014) распределение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), по скоростям осевого вращения характеризуется наличием относительных избытков астероидов с быстрым ($\omega = 8\text{--}11$ об./сут) и медленным ($\omega < 2$ об./сут) вращением. Во второй из этих работ было показано, что эти избытки объясняются влиянием на вращение АСЗ YORP-эффекта (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack effect, Rubincam, 2000). Он возникает из-за отражения и поглощения солнечного излучения и его переизлучения в тепловом диапазоне вращающимся телом неправильной формы. Как показано в ряде работ (см., например, Rubincam, 2000; Bottke и др., 2006), величина влияния этого эффекта зависит от размера астероида, его формы и от количества солнечного излучения, получаемого телом. При этом приращение углового момента в зависимости от формы и направления вращения астероида может быть как положительным, так и отрицательным, и именно поэтому в распределении существуют избытки как быстрого, так и медленного вращения. Действие эффекта, безусловно, является слабым, однако оно накапливается на протяжении времени существования астероида и поэтому может приводить к заметному изменению скорости враще-

ния не только отдельного астероида, но и распределения по скоростям вращения определенной популяции астероидов.

Естественно предположить, что YORP-эффект влияет и на вращение астероидов главного пояса, в первую очередь, астероидов малых размеров внутренней части пояса. Но будет ли этот эффект достаточно заметным в распределении таких астероидов по скоростям вращения, чтобы уверенно его интерпретировать? Ведь инсоляция астероидов в главном поясе в среднем в три раза меньше по сравнению с инсоляцией АСЗ, поэтому влияние солнечного излучения на вращение даже малых астероидов внутренней части главного пояса будет, безусловно, очень слабым и, в лучшем случае, на пределе его обнаружения. Кроме того, как отмечается в статье Marzari и др. (2011), эволюция осевого вращения малых астероидов главного пояса определяется не только влиянием солнечного излучения (т.е. YORP-эффекта), но и столкновениями. При этом оба механизма действуют по-разному в зависимости от размера объекта и могут значительно изменить состояние его вращения.

Одной из попыток ответить на поставленный вопрос можно считать работу Pravec и др. (2008). Авторы анализировали распределение по скоростям вращения малых астероидов ($D = 3\text{--}15$ км)

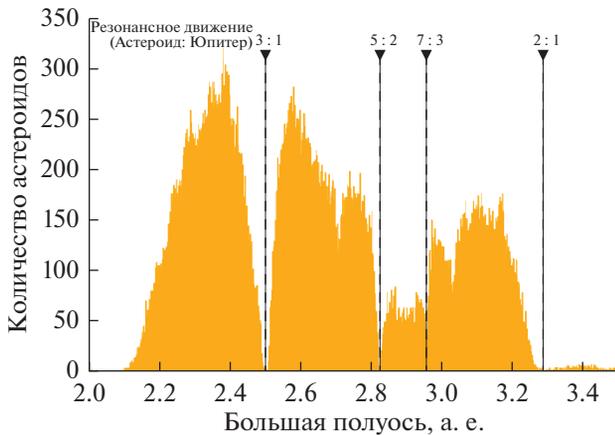


Рис. 1. Распределение астероидов главного пояса по большим полусям их орбит.

главного пояса вместе с пересекающими орбиту Марса и отметили присутствие на нем избытка астероидов с медленным вращением ($\omega < 1$ об./сут). В остальном диапазоне скоростей вращения распределение близко к равномерному. Тем не менее они приходят к выводу, что наблюдаемое распределение, скорее всего, контролируется YORP-эффектом.

С тех пор выборка данных по скоростям вращения малых астероидов возросла более чем на порядок (с 268 объектов до 7800). Воспользуемся имеющимися новыми данными и несколько другим подходом в попытке ответить на поставленный выше вопрос.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛЫХ АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА ПО СКОРОСТЯМ ВРАЩЕНИЯ

Будем анализировать скорости вращения астероидов малых размеров ($D = 3\text{--}15$ км) только главного пояса, рассматривая при этом для срав-

нения астероиды как внутренней части пояса, так и внешней. Можно условно поделить пояс астероидов на указанные две части значением большой полуоси, например, $a = 2.5, 2.6$ или 2.7 а. е., как это обычно делается. А можно использовать естественное деление пояса астероидов на зоны орбитальными резонансами с Юпитером. На рис. 1 показано распределение астероидов главного пояса по большим полусям их орбит. Воспользуемся данным делением и будем считать, как это общепринято, внутреннюю зону пояса с $a = 2.06\text{--}2.5$ а. е. (т.е. ограниченную резонансом 3 : 1), среднюю зону с $a = 2.5\text{--}2.82$ а. е. (т.е. между резонансами 3 : 1 и 5 : 2) и внешнюю зону с $a = 2.82\text{--}3.28$ а. е. (т.е. между резонансами 5 : 2 и 2 : 1). Это три популяции астероидов главного пояса, сопоставимые по численности и находящиеся на разных гелиоцентрических расстояниях.

Рис. 2 показывает распределение астероидов рассматриваемых размеров по скоростям вращения для трех выделенных зон главного пояса. Данные о периодах вращения астероидов и их размерах брались из базы данных Warner и др. (2009), обновленных на 22 декабря 2017 г. и представленных на сайте <http://www.MinorPlanet.info/lightcurvedatabase.htm>.

Хорошо видна эволюция распределения с возрастом гелиоцентрического расстояния. Так, распределение для внутренней зоны характеризуется наличием четких избытков быстрого ($\omega = 6\text{--}9$ об./сут) и медленного ($\omega < 1$ об./сут) вращения, подобных тем, которые имеют место в распределении для АСЗ. В средней зоне оба избытка выражены гораздо слабее, а во внешней — избыток объектов быстрого вращения отсутствует совсем, а медленного выражен еще слабее, чем во внутренней зоне.

Таким образом, с возрастанием гелиоцентрического расстояния распределение по скоростям вращения от весьма нерегулярного (с двумя избытками) во внутренней части пояса становится

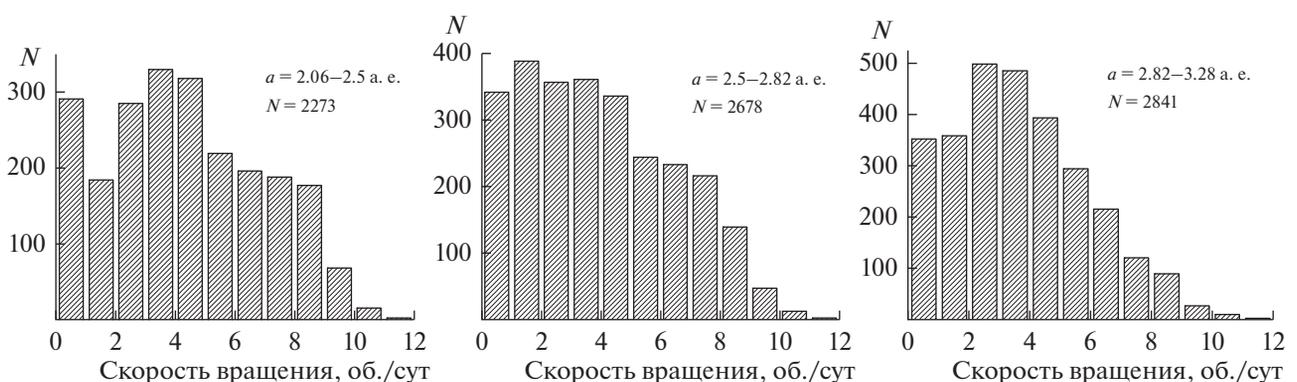


Рис. 2. Распределение малых астероидов ($D = 2.8\text{--}15.2$ км) по скоростям вращения для трех выделенных зон главного пояса: внутренней $a = 2.06\text{--}2.5$ а. е. (слева), средней $a = 2.5\text{--}2.82$ а. е. (в центре) и внешней $a = 2.82\text{--}3.28$ а. е. (справа).

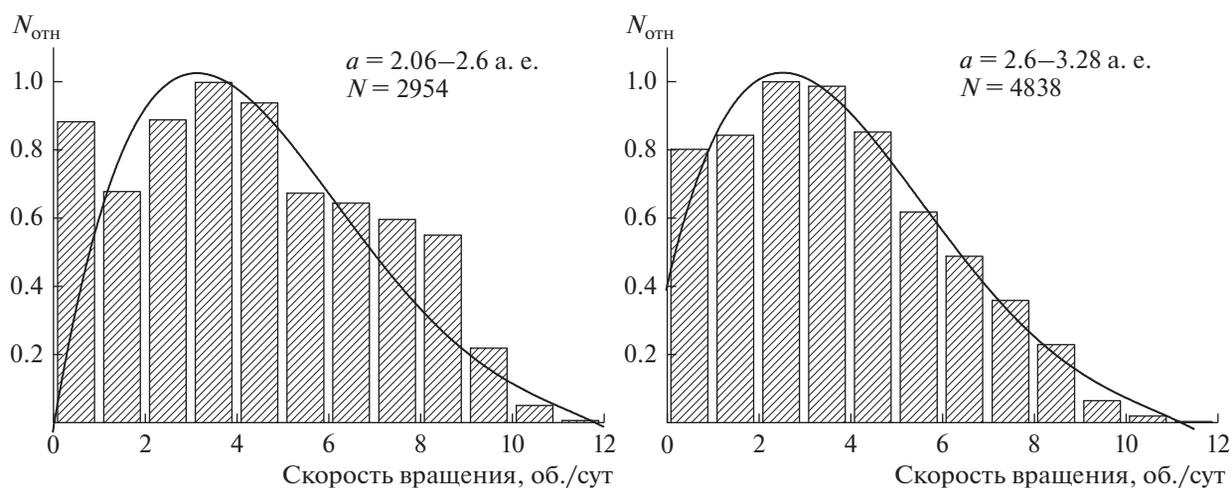


Рис. 3. Относительные распределения малых астероидов по скоростям вращения для внутренней (слева) и внешней (справа) областей главного пояса.

более регулярным и во внешней части пояса приближается по форме к распределению для крупных астероидов, которое, как было показано в работах (Binzel и др., 1989; Pravec, Harris, 2000; Harris, Pravec, 2006), хорошо аппроксимируется максвелловским распределением, указывающим на насыщенную столкновительную эволюцию вращения крупных астероидов. Такая эволюция распределения малых астероидов качественно хорошо согласуется с влиянием на их вращение именно YORP-эффекта. Поэтому для дальнейшего изучения и выявления возможного влияния YORP-эффекта будем сравнивать распределения по скоростям вращения рассматриваемых астероидов только для двух областей главного пояса — внутренней и внешней, разделенных между собой большой полуосью $a = 2.6$ а. е.

На рис. 3 приведены полученные распределения малых астероидов по скоростям вращения для двух указанных областей пояса. Для их сравнения распределение для внешней части пояса ($a > 2.6$ а. е.) аппроксимировано полиномом 4-й степени, и полученная аппроксимационная кривая перенесена на распределение для $a < 2.6$ а. е. Видно заметное различие приведенных распределений: распределение для астероидов внутренней части пояса показывает избытки объектов с быстрым ($\omega = 7-10$ об./сут) и медленным ($\omega < 1$ об./сут) вращением, которые либо отсутствуют, либо слабо выражены на распределении для более удаленной от Солнца внешней части пояса. Как уже отмечалось, эти избытки аналогичны тем, которые присутствуют на распределении по скоростям вращения АСЗ и которые были объяснены действием YORP-эффекта (Lupishko, Tielieusova, 2014). Небольшой вклад в формирование отмеченных избытков могут вносить двойные и тройные астероиды, поскольку периоды вращения ос-

новных тел кратных астероидов в основном соответствуют избытку быстрого вращения, а орбитальные периоды — избытку медленного вращения. В связи с этим известные кратные астероиды исключены в приведенных на рис. 3 распределениях.

ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТЕЙ ОСЕВОГО ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, ИХ СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА И СРЕДНЕЙ ИНСОЛЯЦИИ

Если причиной формирования избытков астероидов с быстрым и медленным вращением является действительно YORP-эффект, то, по аналогии с АСЗ, естественно ожидать, что астероиды в избытках должны быть в среднем меньшими в размерах, чем в середине распределения ($\omega = 2-5$ об./сут). Рис. 4 показывает зависимость среднего диаметра астероидов от их скорости вращения. В избытке быстрого вращения средний размер астероидов оказался действительно меньшим примерно в 1.5 раза, чем на средних скоростях вращения. Однако в избытке медленного вращения средний размер астероидов остается примерно таким, как и в центре распределения, или даже несколько большим. Возможных причин этого факта может быть несколько. Во-первых, влияние наблюдательной селекции: чем медленнее вращается астероид, тем труднее определить его период вращения (нужны и более точные, и более продолжительные во времени наблюдения). Поэтому в таких случаях обычно наблюдаются более яркие (т.е. в среднем более крупные) астероиды. Во-вторых, влияние столкновений на формирование избытка медленно вращающихся астероидов. Так Marzari и др. (2011) и Statler (2009) отмечают, что мелкомасштабные изменения топографии мало-

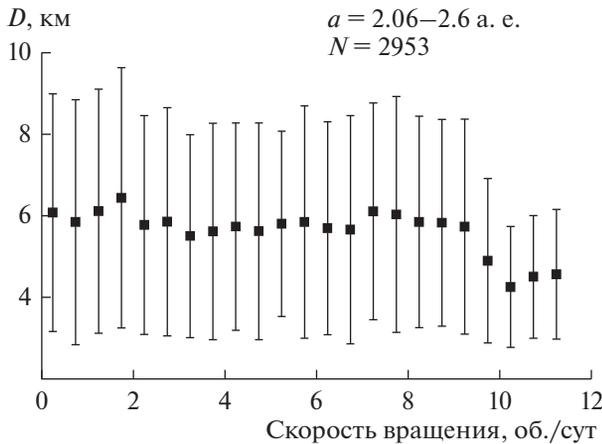


Рис. 4. Взаимозависимость диаметра и скорости осевого вращения малых астероидов ($D = 3–15$ км) внутренней части главного пояса.

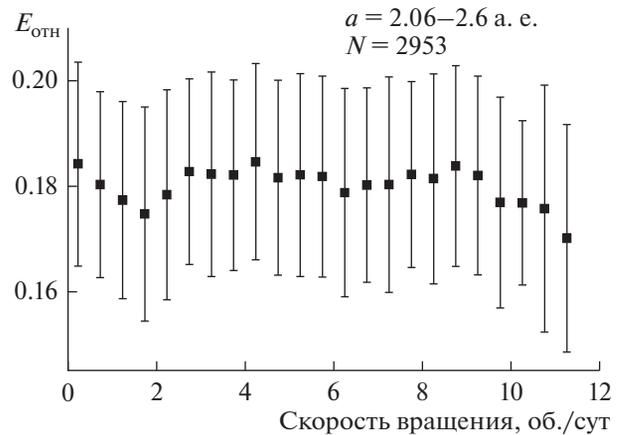


Рис. 5. Взаимозависимость относительной инсоляции и скорости осевого вращения малых астероидов внутренней части главного пояса.

го и медленно вращающегося астероида, вследствие его бомбардировки и образования кратеров на поверхности, приводят к случайным (блуждающим) изменениям скорости вращения, т.е. к нарушению YORP-цикла и даже к изменению знака YORP-эффекта (Statler, 2009), а в итоге — к возрастанию избытка медленного вращения.

Таким образом, в формировании этого избытка участвуют не только YORP-эффект, но и столкновения, а это значит, что зависимость от размера суммарного эффекта должна быть более сложной. В то же время избыток астероидов с быстрым вращением формируется в основном YORP-эффектом (Marzari и др., 2011).

Еще одна возможная причина — это влияние гравитационных сил со стороны Юпитера и других планет на состояние осевого вращения астероидов. Так, например, в работе Vokrouhlický и др. (2006) показано, что динамика осевого вращения астероидов внутренней части пояса претерпевает сильные возмущения со стороны многочисленных перекрывающихся вековых орбитальных резонансов. В результате этого долговременная эволюция векторов осевого вращения астероидов внутреннего пояса может быть экстремально хаотичной и сложной.

Эффективность действия YORP-эффекта, как уже упоминалось, зависит от получаемого телом количества солнечной энергии, т.е. инсоляции. Чем больше инсоляция, тем сильнее должно быть действие этого эффекта на торможение или ускорение осевого вращения тела. Поэтому представляет интерес сравнение усредненной относительной инсоляции $E_{\text{отн}}$, получаемой астероидами внутренней части главного пояса, в избытках и в центре распределения. Формула для вычисления относительной инсоляции $E_{\text{отн}}$ получена в предположении, что для данного астероида она про-

порциональна среднему по времени значению обратного квадрата расстояния до Солнца в пределах одного оборота по его орбите (Nesvorný, Vokrouhlický, 2007; Lupishko, Tielieusova, 2014):

$$E_{\text{отн}} = \frac{1}{a^2 \sqrt{1 - e^2}},$$

где a и e — большая полуось и эксцентриситет орбиты, соответственно.

На рис. 5 показана взаимозависимость относительной инсоляции $E_{\text{отн}}$, получаемой рассматриваемыми астероидами, и их скоростей вращения. Как видно из рисунка, плавного (как в случае AC3) возрастания относительной инсоляции к краям распределения не наблюдается. Можно отметить резкое линейное возрастание инсоляции в области избытка медленного вращения ($\omega < 2$ об./сут) и уменьшение $E_{\text{отн}}$ в области избытка быстрого вращения, хотя, скорее всего, эти “особенности” обусловлены случайным разбросом точек. Это может быть из-за более сильной зависимости YORP-эффекта от размера (и следовательно, массы астероида), чем от инсоляции. Ведь в рассматриваемой внутренней части пояса относительная инсоляция астероидов варьируется в пределах $E_{\text{отн}} = 0.15–0.22$, т.е. всего в полтора раза. Размеры же рассматриваемых астероидов (3–15 км) могут различаться в 5 раз, а соответствующие им массы — вплоть до двух порядков.

Рассмотрим эту зависимость более детально. Ясно, что в рассматриваемой внутренней зоне пояса наименьшую инсоляцию будут иметь наиболее удаленные от Солнца астероиды. Так, для астероидов, находящихся за пределами резонанса $2 : 5$ ($a = 2.5–2.6$ а. е.), относительная инсоляция находится в пределах $E_{\text{отн}} = 0.15–0.163$ (см. рис. 6), а для астероидов внутри резонанса $2 : 5$ ($a < 2.5$ а. е.) — в пределах $E_{\text{отн}} = 0.163–0.23$. Чем меньше сама ин-

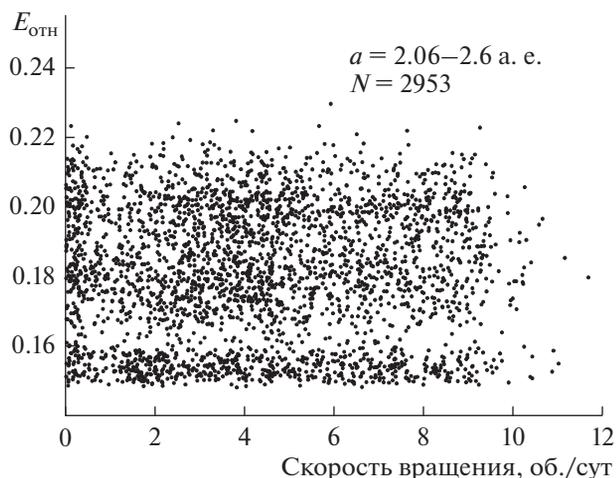


Рис. 6. Взаимозависимость относительной инсоляции и скорости вращения малых астероидов внутренней части главного пояса ($a = 2.06\text{--}2.6$ а. е.).

соляция, тем меньше могут быть ее относительные изменения. Поэтому будем рассматривать только инсоляцию астероидов, находящихся внутри резонанса $2 : 5$ ($a < 2.5$ а. е.), т.е. астероидов с более высокой инсоляцией $E_{\text{отн}} = 0.163\text{--}0.23$. На рис. 6 видно разрежение точек в области $E_{\text{отн}} = 0.160\text{--}0.163$, которое соответствует резонансу $2 : 5$, и едва заметное разрежение при $E_{\text{отн}} = 0.19$, соответствующее слабым резонансам $7 : 2$ и $10 : 3$.

На рис. 7 показаны полученные взаимозависимости относительной инсоляции и скорости осевого вращения астероидов для двух указанных диапазонов значений $E_{\text{отн}}$, разделенных значением $E_{\text{отн}} = 0.19$. Обе зависимости показывают слабое плавное возрастание относительной инсоля-

ции к краям распределения, которое качественно согласуется с действием YORP-эффекта.

ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЬ ВЫТЯНУТОСТИ ФОРМЫ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ МАЛЫХ АСТЕРОИДОВ

Как известно, действие YORP-эффекта проявляется на телах неправильной асимметричной формы. В общем случае вытянутость формы не является признаком ее нерегулярности (например, эллипсоид вращения), однако в случае реальных астероидов вытянутость формы можно рассматривать в первом приближении мерой ее иррегулярности. На рис. 8 представлены корреляции усредненной максимальной амплитуды A_{max} кривых блеска малых астероидов, характеризующей вытянутость их формы, и скорости их вращения для трех зон главного пояса. Можно видеть, что астероиды с максимальными амплитудами, т.е. наиболее вытянутые, сосредоточены в избытке медленного вращения, а с минимальными амплитудами, т.е. наименее вытянутые, находятся в избытке быстрого вращения. При этом на средних частотах вращения ($\omega \sim 4$ об./сут) имеет место локальный максимум. Такой асимметричный и волнообразный вид этой зависимости представляет собой отдельный научный интерес и нуждается в объяснении. Однако для нас важно то, что характер этой зависимости сохраняется для всех трех зон пояса, при этом он заметно эволюционирует при переходе от внутренней зоны к внешней. Так, средняя амплитуда на краю избытка медленного вращения ($\omega = 0.25$ об./сут) уменьшается от 0.69 зв. вел. во внутренней части пояса до 0.60 зв. вел. во внешней части, а на краю избытка быстрого вращения, наоборот, возрастает от 0.14 зв. вел. до 0.27 зв. вел. с промежуточными значениями в средней зоне пояса. Таким обра-

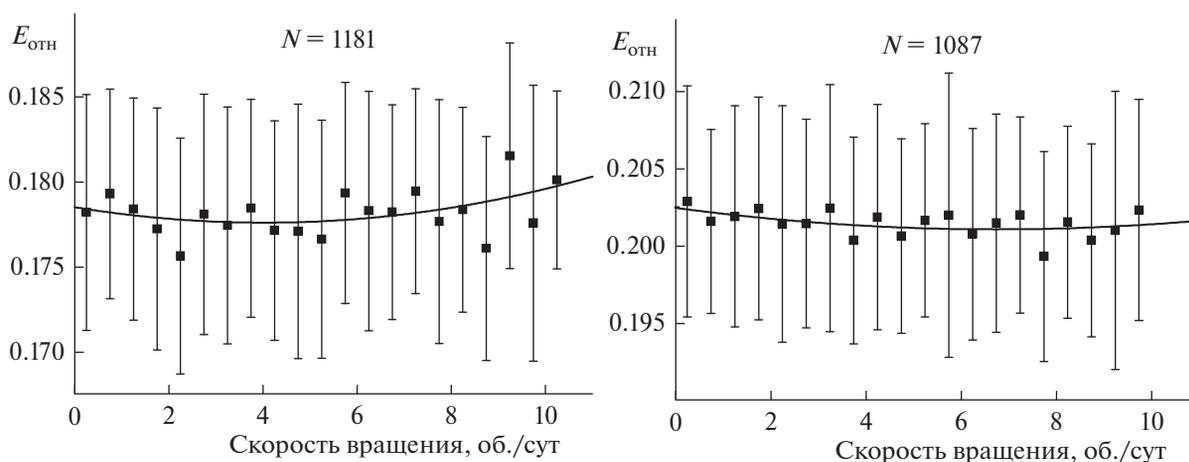


Рис. 7. Взаимозависимость относительной инсоляции и скорости осевого вращения малых астероидов внутренней части главного пояса.

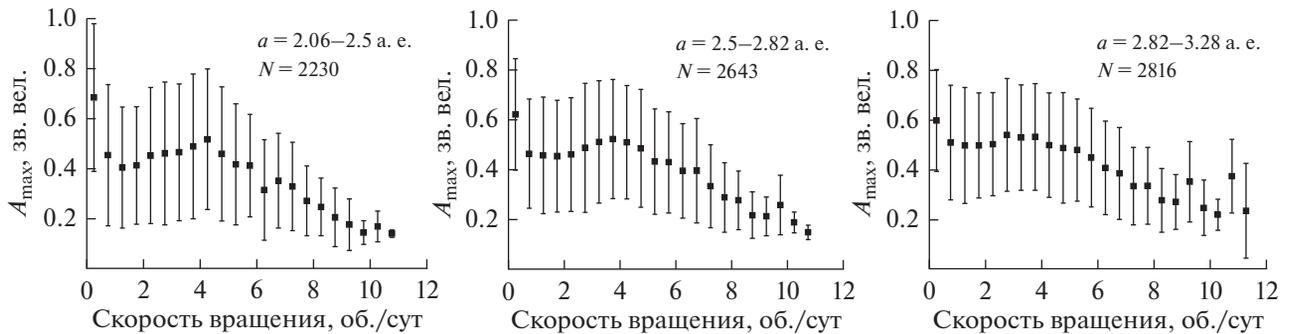


Рис. 8. Зависимость максимальной амплитуды кривых блеска малых астероидов ($D = 3\text{--}15$ км) от их скорости вращения для внутренней (слева), средней (в центре) и внешней (справа) зон главного пояса.

зом, весь диапазон амплитуд астероидов уменьшается от 0.54 зв. вел. во внутренней зоне пояса до 0.46 зв. вел. в средней и до 0.27 зв. вел. во внешней. Связан ли с YORP-эффектом такой характер эволюции рассматриваемой зависимости с гелиоцентрическим расстоянием? Имеющиеся наблюдательные данные свидетельствуют в пользу утвердительного ответа.

Во-первых, наиболее сильное действие YORP-эффекта на вращение астероидов должно быть, безусловно, во внутренней зоне пояса, которая ближе к Солнцу. Именно здесь ускоряя осевое вращение слабо консолидированных астероидов со структурой типа “rubble piles” (груда камней) до предельной скорости $\omega \sim 11$ об./сут, соответствующей пределу прочности таких тел (spin-barrier, см. Harris, Pravec, 2006), YORP-эффект может разогнать амплитуду кривой блеска, т.е. вытянутость тела, до максимального значения. При дальнейшем возрастании скорости вращения за счет YORP-эффекта в результате возрастания центробежных сил происходит деление астероида с образованием системы двух или нескольких слабо вытянутых тел. По этой причине во внутренней зоне пояса присутствуют тела как с максимальными, так и с минимальными амплитудами. С переходом в среднюю и внешнюю зоны эффективность YORP-эффекта снижается, и диапазон средних амплитуд тоже уменьшается.

Во-вторых, асимметричный и волнообразный вид зависимости на рис. 8 тоже свидетельствует в пользу YORP-эффекта. Представим себе, что распределение амплитуд на рис. 8 первоначально было одномодальным или равномерным. YORP-эффект, ускоряя или замедляя скорость вращения, будет смещать астероиды на таком графике влево и вправо, т.е. в сторону избытков как медленного, так и быстрого вращения. Замедляя свое вращение и смещаясь влево, астероиды будут сохранять свою амплитуду кривой блеска (т.е. вытянутость формы), какой бы большой она ни была. В итоге, в избытке медленного вращения астероиды с большими амплитудами (вытянутые) будут

накапливаться и сохраняться вплоть до катастрофического столкновения и полного разрушения. Если же астероид вследствие YORP-эффекта ускоряет свое вращение, то на графике (рис. 8) он будет смещаться вправо, при этом его форма будет либо сохраняться (если это монолитное тело), либо удлиняться за счет центробежной силы (если это структура “rubble piles”) вплоть до разделения тела и образования кратной системы с малыми амплитудами компонент. Тогда почему же нет больших амплитуд в правой части рис. 8? На самом деле астероиды с большими амплитудами там есть, даже в области $\omega = 8\text{--}9$ об./сут есть несколько астероидов с амплитудой $\sim 0.6\text{--}0.7$ зв. вел., но все же их относительно мало по сравнению с количеством астероидов с малыми амплитудами (~ 0.2 зв. вел.). Это хорошо видно на рис. 9, который показывает распределение конкретных астероидов на диаграмме “амплитуда–скорость вращения” (по этим данным построен левый график на рис. 8).

Такая динамика вращения, обусловленная во многом влиянием YORP-эффекта, и приводит к столь асимметричному распределению амплитуд на рис. 8: большие амплитуды со стороны избытка медленного вращения, а малые – со стороны избытка быстрого вращения. Обращает на себя внимание практически линейное уменьшение усредненной амплитуды с возрастанием скорости вращения астероидов справа от локального максимума. Такое поведение можно объяснить началом процесса распада высокоамплитудных тел при этих значениях скоростей и соответствующих им амплитуд (~ 0.5 зв. вел., см. рис. 8), который все больше преобладает с приближением к критической скорости $\omega = 11$ об./сут. А это, в свою очередь, указывает на то, что большая доля объектов в популяции малых астероидов являются структурами типа “rubble piles”. Этот вывод хорошо согласуется с данными Pravec, Harris (2000), Campo Bagatin и др., (2001), Michel (2014), Deller (2015) и других авторов.

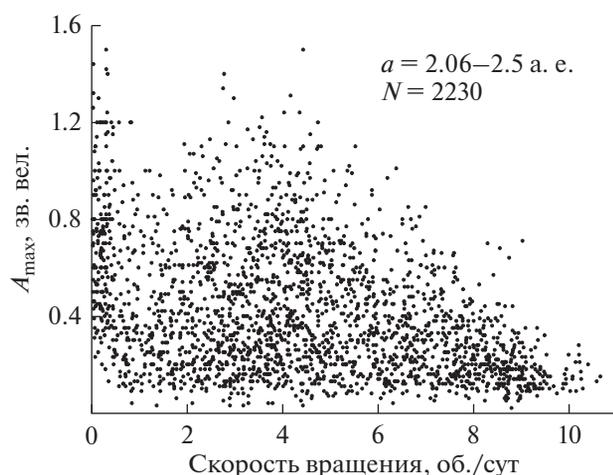


Рис. 9. Исходные данные, по которым построена зависимость средней амплитуды кривых блеска рассматриваемых астероидов от скорости их вращения (левый график на рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа скоростей вращения малых астероидов ($D = 3–15$ км) главного пояса показано, что эволюция распределения их по скоростям вращения в зависимости от гелиоцентрического расстояния в значительной степени определяется влиянием солнечного излучения. Несмотря на то, что солнечная инсоляция во внутренней части главного пояса ($a = 2.06–2.6$ а. е.) в среднем в три раза меньше, чем в области орбит астероидов, сближающихся с Землей, ее влияние на распределение популяции рассматриваемых объектов по скоростям вращения оказывается вполне ощутимым, чтобы быть обнаруженным из наблюдательных данных. Таким образом, этот экспериментальный результат качественно указывает на то, что влияние YORP-эффекта достигает астероидов главного пояса с размерами до 15 км, по крайней мере его внутренней части. Ясно, что подобное влияние может быть заметным и для астероидов внешней части пояса, однако существенно меньших размеров. Кроме того, на основе анализа наблюдательных данных подтвержден вывод о том, что большая доля объектов в популяции малых астероидов главного пояса являются структурами типа “rubble piles”.

В заключение отметим, что эволюция вращения малых астероидов главного пояса отличается от эволюции вращения АСЗ тем, что последние практически не сталкиваются между собой, поэтому действие YORP-эффекта проявляется в более чистом виде, на него не накладывается отме-

ченный выше эффект столкновений. В этом смысле выявление влияния YORP-эффекта на вращение астероидов главного пояса по имеющимся наблюдательным данным представляет существенно более сложную задачу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Binzel R.P., Farinella P., Zappala V., Cellino A.* Asteroid rotation rates: distributions and statistics // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 416–441.
- Bottke (Jr.) W.F., Vokrouhlický D., Rubincam D.P., Nesvorný D.* The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 2006. № 34. P. 157–191.
- Campo Bagatin A., Petit J.-M., Farinella P.* How many rubble piles are in the asteroid belt? // *Icarus*. 2001. V. 149. № 1. P. 198–209.
- Deller J.F.* Hyper-velocity impacts on rubble pile asteroids. Ph.D. Thesis. Univ. of Kent, Canterbury, U.K. and Intern. Max Planck Research School for Solar System Science, Göttingen, Germany. 2015. 205 p.
- Harris A.W., Pravec P.* Rotational properties of asteroids, comets and TNOs // *Asteroids, Comets, Meteors* / Eds Lazzaro D. et al. Proc. IAU Symp. 229 “ACM 2005” Aug. 7–12, 2005. Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. Cambridge Univ. Press. 2006. P. 439–447.
- Lupishko D., Tielieusova I.* Influence of the YORP effect on rotation rates of near-Earth asteroids // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2014. V. 49. № 1. P. 80–85.
- Marzari F., Rossi A., Scheeres D.J.* Combined effect of YORP and collisions on the rotation rate of small Main Belt asteroids // *Icarus*. 2011. V. 214. № 2. P. 622–631.
- Michel P.* Formation and physical properties of asteroids // *Elements*. 2014. V. 10. Iss. 1. P. 19–24. doi 10.2113/gselements.10.1.19
- Nesvorný D., Vokrouhlický D.* Analytic theory of the YORP effect for near-spherical objects // *Astron. J.* 2007. V. 134. P. 1750–1768.
- Pravec P., Harris A.W.* Fast and slow rotation of asteroids // *Icarus*. 2000. V. 148. № 1. P. 12–20.
- Pravec P., Harris A.W., Vokrouhlický D., Warner B.D., Kušnirak P., Hornoch K., Pray D.P., Higgins D., Oey J., Galad A. and 21 co-authors.* Spin rate distribution of small asteroids // *Icarus*. 2008. V. 197. № 2. P. 497–504.
- Rubincam D.P.* Radiative spin-up and spin-down of small asteroids // *Icarus*. 2000. V. 148. № 1. P. 2–11.
- Statler T.S.* Extreme sensitivity of the YORP effect to smallscale topography // *Icarus*. 2009. V. 202. № 2. P. 502–513.
- Vokrouhlický D., Nesvorný D., Bottke W.F.* Secular spin dynamics of inner main-belt asteroids // *Icarus*. 2006. V. 184. № 1. P. 1–28.
- Warner B.D., Harris A.W., Pravec P.* The asteroid database // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 134–146.