

УДК 52-17::521.182::523.44

СМЕЩЕНИЕ ФОТОЦЕНТРА В ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ АКТИВНЫХ АСТЕРОИДОВ (6478) ГОЛТ И (248370) 2005 QN173/433P

© 2024 г. С. Р. Павлов ^{a,*}, Ю. А. Чернетенко ^{a,**}

^aИПА РАН, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: *sr.pavlov@iaaras.ru; **cya@iaaras.ru

Поступила в редакцию 29.11.2023 г.

После доработки 22.01.2024 г.

Принята к публикации 29.02.2024 г.

Активные астероиды — это астероиды Главного пояса с физическими проявлениями кометной активности, выражающейся в значительном изменении блеска объекта, наблюдении комы и хвостов. В связи с этим возникает вопрос о том, требуют ли эти тела более сложного подхода при уточнении орбитальных параметров по сравнению с обычными астероидами. В данной работе мы провели серию уточнений параметров орбит активных астероидов (6478) Голт и (248370) 2005 QN173/433P как с учетом негравитационных ускорений (НУ), что принято для комет, так и без них. На интервалах времени, совпадающих с периодами активности рассматриваемых астероидов, мы обнаружили статистически значимые систематические отклонения в остаточных разностях между наблюдаемыми и вычисленными значениями в позиционных наблюдениях данных тел, (О–С). В результате проведенной работы мы выяснили, что учет негравитационного ускорения по модели Марсдена не приводит к улучшению представления наблюдений. В работе также рассмотрено предположение о наличии в наблюдениях смещения фотоцентра (СФ), т.е. несовпадения центра тяжести тела и центра яркости. Полученная величина смещения фотоцентра в сторону от Солнца для астероида (6478) составляет 985 ± 54 км, а для астероида (248370) -1145 ± 119 , что примерно соответствует размерам сфер Хилла соответствующих тел. Учет СФ позволяет для (248370) устранить, а для (6478) существенно уменьшить систематические отклонения в остаточных разностях.

Ключевые слова: активные астероиды, позиционные наблюдения, негравитационное ускорение, смещение фотоцентра, астероид (6478) Голт, астероид (248370) 2005 QN173/433P

DOI: 10.31857/S0320930X24050072, EDN: LTISJV

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия были открыты необычные малые тела: астероиды Главного пояса с физическими проявлениями кометной активности, которые получили название активные астероиды (АА) (Jewitt, 2012). Некоторые из АА имеют двойное обозначение и внесены как в каталоги астероидов, так и каталоги комет. Критерий Тиссерана относительно Юпитера (T_J) является хорошим индикатором для различения комет семейства Юпитера от астероидов (Jewitt, 2012): если $T_J > 3.08$, малое тело можно считать

астероидом, если $T_J < 3.08$ — кометой. Хотя для активных астероидов $T_J > 3.08$, они подобно кометам обнаруживают комы, хвосты и другие визуальные доказательства потери массы. Присутствие пылевых хвостов является наиболее частым проявлением активности среди наблюдавшихся АА. У некоторых пылевые хвосты наблюдаются продолжительное время, что подразумевает наличие непрерывных процессов выброса вещества, в то время как другие демонстрируют эпизодические хвосты, указывающие на дискретность характера процесса (Jewitt и др., 2015; 2019). В качестве механизмов потери

массы активными астероидами рассматриваются (Jewitt, 2012) сублимация льдов, вращательная неустойчивость, столкновения с другими телами с сопутствующим ударным выбросом вещества, электростатическое отталкивание, разрушение вследствие неравномерного нагрева.

В зависимости от причин, приводящих к наблюдаемым проявлениям активности, их по-разному следует учитывать при построении орбит этих тел, т.е. получении набора параметров, наилучшим образом представляющих наблюдения. Если кометная активность (кома, хвост) для какого-то тела наблюдается периодически и усиливается вблизи перигелия, то можно предполагать, что она вызывается сублимацией льдов. В этом случае возможно наличие негравитационного ускорения, величина которого может быть оценена из позиционных наблюдений совместно с уточнением параметров орбиты. Для визуально протяженных объектов может оказаться значимой такая редукция наблюдений, как смещение фотоцентра. Если активность вызвана столкновением, то возможно мгновенное изменение скорости тела.

Цель нашей работы состояла в уточнении орбитальных параметров АА, уточнении их моделей движения и редукции наблюдений. В качестве объектов исследования были выбраны АА, имеющие достаточно большое для анализа число наблюдений: астероид (6478) Голт, имеющий 3709 наблюдений, и астероид (248370)/433Р, имеющий 659 наблюдений (сайт Международного центра малых планет https://minorplanetcenter.net/db_search на 01.11.2023 г.).

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

При исследовании движения астероидов и определении параметров орбит астероидов, как правило, необходимо учитывать возмущающие влияния планет, карликовых планет и наиболее крупных астероидов. В нашей работе уравнения движения в форме Энке интегрировались методом Эверхарта (Everhart, 1974). Координаты возмущающих планет вычислялись в соответствии с эфемеридой DE440 (Park и др., 2021), учитывались также возмущения от Плутона, Цереры, Паллады и Весты. Массы возмущающих тел приняты также в соответствии с эфемеридой DE440.

Для учета НУ использовался метод Марсдена (Marsden и др., 1973). В его основе лежат модель ледяного кометного ядра и предположение о непрерывном действии негравитационных сил, величина которых зависит от гелиоцентрического расстояния r и симметрична относительно

перигелия. Форма этой зависимости основана на эмпирически полученной формуле скорости испарения водяного льда и имеет вид:

$$g(r) = 0.111262 (r/r_0)^{-2.15} \{1 + (r/r_0)^{5.093}\}^{-4.6142},$$

где $r_0 = 2.808$ а. е. Составляющие негравитационных ускорений (НУ) по радиусу-вектору (в сторону от Солнца), перпендикулярному к нему в плоскости орбиты и перпендикулярно плоскости орбиты, имеют вид, соответственно: $A_1 g(r)$, $A_2 g(r)$, $A_3 g(r)$. Параметры A_1 , A_2 , A_3 , называемые радиальным, трансверсальным и нормальным параметром, определяются из наблюдений совместно с параметрами орбиты и имеют размерность ускорения (а. е./сут²). Функция $g(r)$ выбрана так, что $g(1.0) = 1.0$ и, следовательно, A_1 , A_2 , A_3 являются составляющими НУ на гелиоцентрическом расстоянии 1 а. е.

Смещение фотоцентра представлялось в виде $S = S_0 f(r)$, где r — гелиоцентрическое расстояние. По аналогии с представлением НУ рассматривались три составляющие вектора смещения S_0 : радиальное (R), трансверсальное (T) и нормальное (N), которые также определяются методом наименьших квадратов совместно с уточнением других параметров. Рассмотрены два варианта представления СФ: 1) $f(r) = 1$, т.е. смещение постоянно, и 2) $f(r) = 1/r^2$.

В процессе уточнения параметров орбит рассматривались два варианта назначения весов позиционным наблюдениям. В одном варианте фотографическим наблюдениям присваивался вес, равный 0.1, остальным наблюдениям — равный 1. Доля фотографических наблюдений невелика (22 наблюдения), и они есть только для астероида (6478), т.е. фактически, наблюдения считались равноточными. В другом варианте веса назначались в соответствии с предложениями работы (Vereš и др., 2017), в которой выполнен статистический анализ астрометрических ошибок наблюдений астероидов, выполненных в основных наблюдательных программах, с учетом времени и интервала наблюдений, наблюдаемой яркости объекта.

АСТЕРОИД (6478) ГОЛТ

Астероид Главного пояса (6478) Голт относится к семейству астероида (25) Фокая. (6478) имеет значение параметра Тиссерана $T_J = 3.46$, что является типичным для астероидов Главного пояса. На интервале времени 30.01.1984 г. — 22.12.2022 г. выполнено 3187 позиционных наблюдений.

В январе 2019 г. у астероида (6478) Голт на ИСЗ Hubble Space Telescope обнаружены два узких хвоста — один длиной 800 тыс. км, другой — почти в четыре раза короче (<https://hubblesite.org/contents/media/images/2019/22/4379-Image.html>). Это обстоятельство вызвало значительный интерес к астероиду. В работах (Jewitt и др., 2019; Chandler и др., 2019; Moreno и др., 2019; Devogèle и др., 2021; Hui и др., 2019) приводится информация о том, что активность в виде хвостов наблюдалась в 2013 и 2016 гг., причем эти события не обнаруживали зависимости от гелиоцентрического расстояния. В работе (Jewitt и др., 2019) скорость выброса пыли оценивается в 0.15 ± 0.05 м/с, а газ практически отсутствует, а по результатам (Hui и др., 2019) хвост состоял из пылевых частиц радиусом от ≥ 20 мкм до 3 мм, выброшенных со скоростью 0.15 ± 0.05 м/с.

Имеются также оценки параметров НУ по модели Марсдена. Согласно (Hui и др., 2019),

$$A_1 = (+0.60 \pm 1.63) \times 10^{-11} \text{ а. е./сут}^2,$$

$$A_2 = (+1.08 \pm 1.35) \times 10^{-13} \text{ а. е./сут}^2,$$

$$A_3 = (+5.39 \pm 2.33) \times 10^{-11} \text{ а. е./сут}^2.$$

Это означает, что, как и у большинства активных астероидов (Hui, Jewitt, 2017), активность по потере массы (6478) недостаточно сильна, чтобы оказывать заметное негравитационное влияние на его орбитальное движение. Не обнаружены значимые негравитационные эффекты в движении (6478) и в работе (Devogèle и др., 2021).

В работе (Jackson и др., 2021) на основании того, что астероид (6478) Голт теряет массу независимо от положения на своей орбите, предполагается, что наблюдаемую активность вызывает вращательная нестабильность. Делается также вывод о том, что астероид может состоять из слабо связанного поверхностного слоя пыли поверх прочного ядра. В работе (Devogèle и др., 2021) найдено, что астероид имеет период вращения $P = 2.4929 \pm 0.0003$ ч. Этот короткий период вращения близок к пределу вращательной устойчивости, при этом плотность ρ должна составлять

не менее 1.85 г/см^3 . В работе (Ли и др., 2021) период вращения оценивается в 2.55 ± 0.10 ч., а плотность — в 1.70 г/см^3 . Близкие к этим оценки получены в работе (Purdum и др., 2021). Диаметр (6478) оценен в работе (Devogèle и др., 2021) как $2.8 (+0.4, -0.2)$ км.

Обобщая результаты этих исследований, можно заключить, что для астероида (6478) наблюдалось несколько периодов активности, причем эти события не зависели от положения на орбите. Скорость выброса пыли оценивается в 0.15 ± 0.05 м/с, а период вращения, ~ 2.5 ч, близок к пределу вращательной устойчивости. На этом основании вероятной причиной активности астероида считается выброс пыли в результате быстрого вращения.

В данной работе мы уточнили параметры орбиты астероида по всем наблюдениям и получили значение среднеквадратической ошибки (СКО) = $0.3963''$. Был выполнен анализ остаточных разностей на наличие в них систематики. В 2013 г. выявить ее не удалось из-за недостаточного числа наблюдений и/или ее отсутствия на этом интервале. Несмотря на существенно большее общее количество наблюдений в 2016 г., активность наблюдалась только в конце интервала наблюдений, что также не позволило обнаружить систематические отклонения в (О—С). Систематика по обеим координатам (прямое восхождение и склонение) уверенно определяется на интервале 2018–2019 гг. с использованием 1301 наблюдения. В табл. 1 приводятся значения коэффициентов формулы линейной аппроксимации ($y = a + bt$, где $t = 0$ соответствует 2019.0) остаточных разностей по прямому восхождению (коэффициенты a , b) и склонению (коэффициенты $a1$, $b1$). Во второй строке приводятся те же значения для варианта назначения весов наблюдениям в соответствии с работой (Vereš и др., 2017). Оба набора коэффициентов имеют близкие значения и ошибки, что говорит об отсутствии связи обнаруженной систематики с особенностями наблюдений на отдельных обсерваториях.

Таблица 1. Коэффициенты линейной аппроксимации (О—С) по прямому восхождению и склонению астероида (6478) на интервале 08.12.2018 г. — 26.06.2019 г. без учета СФ в наблюдениях

Веса наблюдений	Прямое восхождение		Склонение	
	a , угл. с	b , угл. с	$a1$, угл. с	$b1$, угл. с
Наблюдения равноточные	-0.263 ± 0.019	1.373 ± 0.092	0.312 ± 0.019	-1.233 ± 0.093
Веса по работе (Vereš и др., 2017)	-0.321 ± 0.019	1.423 ± 0.094	0.380 ± 0.019	-1.347 ± 0.093

На рис. 1а и 1б показаны $(O-C)$ относительно орбиты, полученной без учета СФ на интервале 2018–2019 гг., и их линейная аппроксимация (пунктирная линия).

При оценке параметров НУ по модели Марсдена на интервале времени 1986–2021 гг. оказалось возможным определить только $A_1 = (-0.0016 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ а. е./сут² (абсолютная величина значения превышает утроенную ошибку), при этом СКО = 0.3960", а систематика в $(O-C)$ сохраняется. Этот результат не противоречит результатам (Нui и др., 2019; Devogèle и др., 2021) в том, что НУ для этого астероида практически отсутствует. Для сравнения, кометы типично имеют величины НУ порядка 10^{-8} а. е./сут².

Совместно с уточнением элементов орбиты для двух периодов активности в 2013 г. и 2019 г. были определены составляющие СФ для вариантов $f(r) = 1$ и $f(r) = 1/r^2$. Оказалось, что остаточные

уклонения для этих двух вариантов практически совпадают, поэтому результаты в табл. 2 приводятся только для $f(r) = 1$. В первом столбце табл. 2 приводится номер решения, во втором – значение СКО, далее составляющие СФ (R , T , N) для наблюдений в 2013 г. и в 2018–2019 гг., n_{obs} означает число наблюдений. Решение 1 получено для наблюдений 2018–2019 гг., решение 2 – для наблюдений 2013 г. и 2018–2019 гг. раздельно, решение 3 получено при совместном использовании в улучшении обеих групп наблюдений.

Из табл. 2 следует, что значения R , T , N для двух интервалов наблюдений согласуются в пределах ошибок этих параметров. Значения СКО уменьшились, по сравнению со значением СКО = 0.3963", полученным без учета СФ. Центр яркости смещен в сторону от Солнца ($R > 0$).

Коэффициенты линейной аппроксимации остаточных уклонений, приведенные в табл. 3,

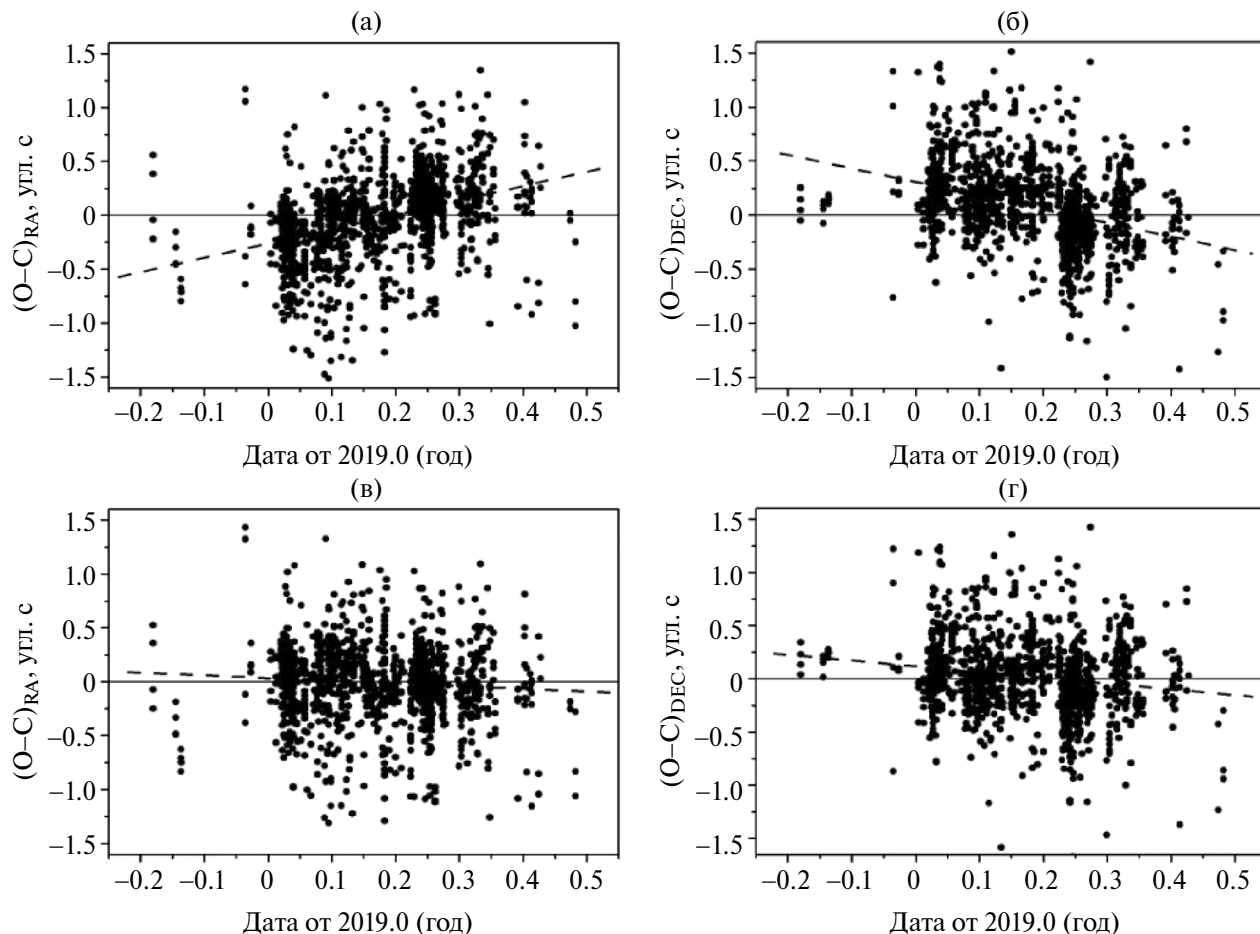


Рис. 1. Уклонения наблюдений астероида (6478) в 2018–2019 гг. от орбиты, полученной без учета СФ: (а) – по прямому восхождению, $(O-C)_{\text{RA}}$; (б) – по склонению, $(O-C)_{\text{DEC}}$. От орбиты, полученной с учетом СФ по радиальному направлению: (в) – по прямому восхождению; (г) – по склонению. Пунктирные линии показывают линейную аппроксимацию уклонений.

Таблица 2. Составляющие смещения фотоцентра (радиальная — R , трансверсальная — T и нормальная — N) астероида (6478) по наблюдениям в 2013 г. и в 2018–2019 гг.

№	СКО, угл. с	Интервал наблюдений: 01.06.2013 г. — 01.12.2013 г. $n_{\text{obs}} = 70$			Интервал наблюдений: 08.12.2018 г. — 26.06.2019 г. $n_{\text{obs}} = 1301$		
		R , км	T , км	N , км	R , км	T , км	N , км
1	0.3756	—	—	—	987 ± 45	-219 ± 31	200 ± 18
2	0.3423	321 ± 191	-124 ± 42	144 ± 41	957 ± 42	-155 ± 29	175 ± 17
Интервал наблюдений: 01.06.2013 г. — 01.12.2013 г., 08.12.2018 г. — 26.06.2019 г. $n_{\text{obs}} = 1371$							
	СКО, угл. с	R , км		T , км		N , км	
3	0.3433	914 ± 39		-144 ± 21		172 ± 14	

показывают, что представление наблюдений улучшилось, хотя по склонению убрать полностью линейный тренд не удалось, что может указывать на более сложное поведение СФ, чем принято в работе. Сравнение элементов орбит, полученных с учетом СФ и без него, показало, что для наклона и долготы восходящего узла изменения являются статистически значимыми.

Таблица 3. Коэффициенты линейной аппроксимации (О—С) астероида (6478) по прямому восхождению и склонению на интервале 08.12.2018 г. — 26.06.2019 г. после учета СФ

Прямое восхождение		Склонение	
a , угл. с	b , угл. с	a_1 , угл. с	b_1 , угл. с
0.028 ± 0.019	-0.269 ± 0.091	0.120 ± 0.019	-0.616 ± 0.091

АСТЕРОИД (248370) 2005 QN137/433P

Астероид (248370), имеющий также кометное обозначение 433P, является астероидом Главного пояса и наблюдается с 2000 г. Его диаметр составляет 3.599 ± 0.214 км, а $T_J = 3.193$ (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=248370 на 01.11.2023 г.)

С 07.07.2021 г. наблюдалась активность астероида (Hsieh и др., 2021; Lister и др., 2022) в виде комы и длинного пылевого хвоста. В работе (Chandler и др., 2021) показано, что астероид был также активен вблизи предыдущего прохождения через перигелий 22.07.2016 г. Активность в области перигелия характерна для комет, поэтому в работе (Chandler и др., 2021) в качестве причины активности (248370) был предложен механизм сублимации льдов. Пылевые частицы, выбрасываемые

из астероида, имеют очень небольшую скорость (Novakovic и др., 2022), примерно 1 м/с для частиц микронного размера и ~ 5 см/с для частиц миллиметрового размера. В работе (Lister и др., 2022) приводится информация о двух возможных значениях периодов обращения астероида вокруг оси: 2.7 ± 0.1 ч и 4.1 ± 0.1 ч, а в работе (Luu и др., 2021) высказывается предположение о том, что быстрое вращение может быть одной из причин потери астероидом массы.

На всем интервале наблюдений, 2000 — 2022 гг., имеется 659 наблюдений, причем в 2016 г. — 78 наблюдений, в 2021 г. — 326 наблюдений. В табл. 4 приводятся результаты вычислений параметров орбиты. В первом столбце приводится номер решения, во втором — значение СКО, в третьем — полученное на всем интервале наблюдений значение составляющей НУ A_1 . В четвертом столбце приводится значение радиальной составляющей СФ, R . Пятый — восьмой столбцы представляют значения коэффициентов формул аппроксимации для прямого восхождения и склонения.

Решение 1 получено при назначении равного веса наблюдениям, решение 2 при назначении наблюдениям весов в соответствии с работой (Vereš и др., 2017). Коэффициенты линейной аппроксимации решения 2 мало отличаются от решения 1. Анализ остаточных разностей в 2021 г. показал наличие систематических уклонений, что показано на рис. 2а, 2б. В наблюдениях 2016 г. систематика не обнаружена, возможно, из-за меньшего числа наблюдений. Решение 3 содержит определение параметра A_1 НУ по наблюдениям на всем интервале (параметры A_2 и A_3 статистически значимо не определяются). Решение 4 содержит результат определения по наблюдениям 2021 г. параметра R , радиальной составляющей СФ (параметры T и N не определяются). Это решение обеспечивает

отсутствие систематических уклонений в остаточных разностях наблюдений 2021 г., как показано на рис. 2в, 2г. Как и для астероида (6478), учет зависимости параметров СФ от гелиоцентрического расстояния r практически не влияет

на результаты решения. Возможно, это связано с тем, что r на интервале активности изменяется в небольших пределах: 2.390 а. е. – 2.591 а. е. Значимых различий между элементами орбиты, полученной с учетом СФ и без него, не обнаружено.

Таблица 4. Результаты вычислений параметров НУ и СФ астероида (248370) и коэффициенты формулы аппроксимации (О–С) по прямому восхождению и склонению

№	СКО, угл. с	A_1 , 10^{-8} а. е./сут ²	R , км	Прямое восхождение		Склонение	
				a , угл. с	b , угл. с	$a1$, угл. с	$b1$, угл. с
1	0.4024	—	—	-1.20 ± 0.17	1.77 ± 0.25	-0.81 ± 0.13	1.13 ± 0.19
2	0.5679	—	—	-1.34 ± 0.17	1.64 ± 0.25	-0.78 ± 0.12	1.02 ± 0.17
3	0.4009	-0.0386 ± 0.0093	—	-1.13 ± 0.17	1.69 ± 0.25	-0.78 ± 0.13	1.10 ± 0.19
4	0.3876	—	1145 ± 119	0.01 ± 0.17	-0.03 ± 0.26	-0.29 ± 0.13	0.36 ± 0.19

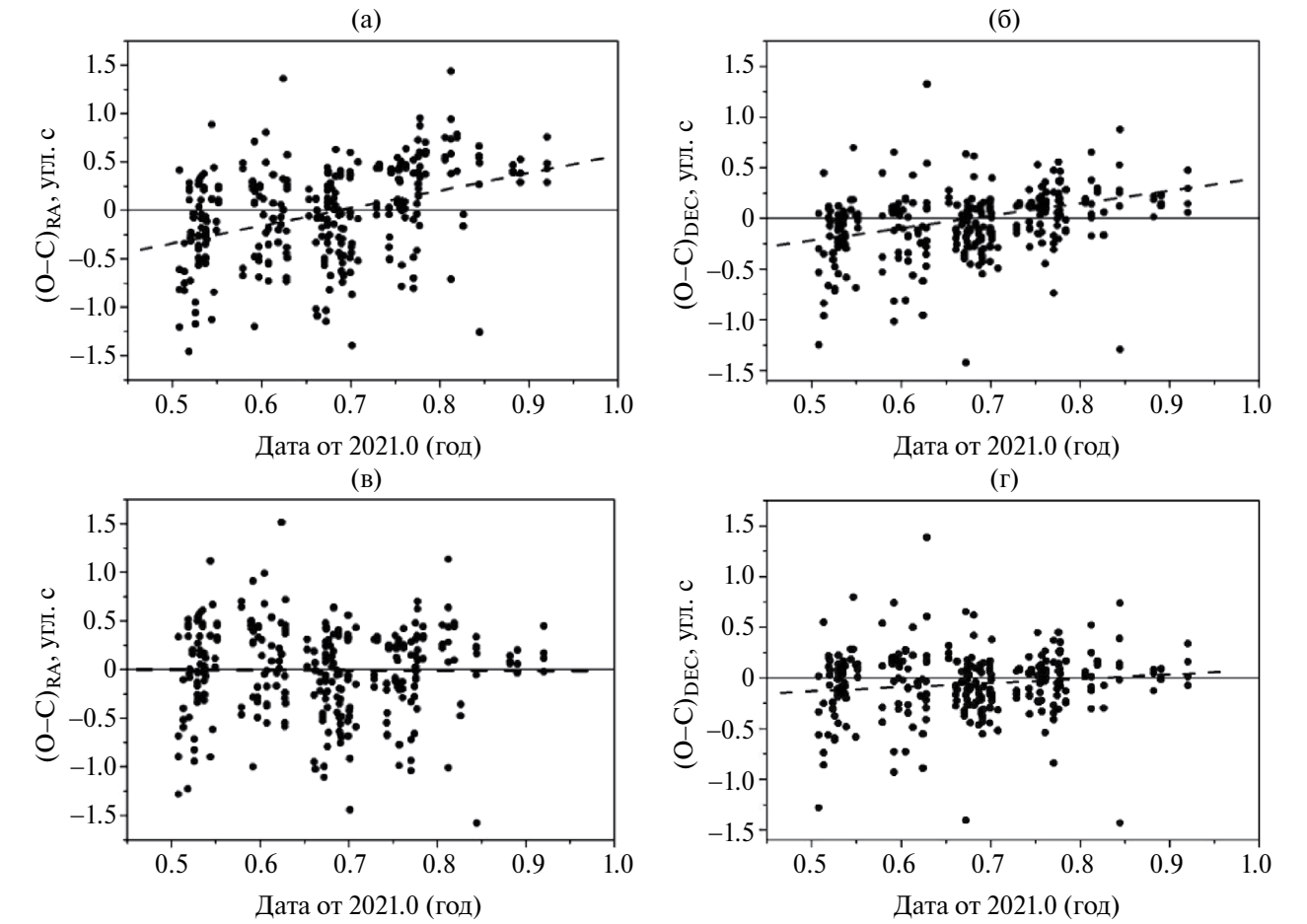


Рис. 2. Уклонения наблюдений астероида (248370) на интервале времени 2021.5 г. – 2022.0 г. от орбиты, полученной без учета СФ: (а) – по прямому восхождению; (б) – по склонению. От орбиты, полученной с учетом СФ по радиальному направлению: (в) – по прямому восхождению; (г) – по склонению. Пунктирные линии показывают линейную аппроксимацию.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для активных астероидов Главного пояса (6478) и (248370) выявлено наличие статистически значимых систематических отклонений от орбиты, (О–С), на интервалах наблюдений, сопровождающихся активностью в виде пылевых хвостов. Может показаться, что эти отклонения являются результатом систематических ошибок наблюдений отдельных обсерваторий, однако необходимо отметить, что 1371 наблюдение астероида (6478) в период активности было получено на 82 обсерваториях, а 326 наблюдений астероида (248370) получено на 33 обсерваториях. Кроме того, в результате использования двух способов назначения весов при уточнении параметров орбиты остаточные разности оказались близки. Поэтому связь систематики в остаточных отклонениях с ошибками отдельных обсерваторий следует исключить.

Для уточнения параметров орбиты были выполнены оценки составляющих НУ по модели Марсдена. Для обоих астероидов статистически значимо определяется только параметр A_1 , для (6478) $A_1 = (-0.0016 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ а. е./сут², для (248370) $A_1 = (-0.0386 \pm 0.0093) \times 10^{-8}$ а. е./сут². Эти значения близки к результатам работ (Hui и др., 2019; Devogèle и др., 2021). Отметим, что по абсолютной величине эти значения A_1 на один–два порядка меньше соответствующих значений, характерных для комет, и практически не изменяют остаточные отклонения наблюдений этих астероидов. Кроме того, отрицательные значения A_1 указывают на то, что реактивное ускорение направлено к Солнцу, т.е. максимальная сублимация происходит на противоположной от Солнца стороне астероида, что противоречит модели Марсдена. На наш взгляд это является важным аргументом против предположений, объясняющих активность данных астероидов сублимацией льдов.

Учет СФ, ранее не использовавшийся при редукации наблюдений астероидов, позволяет для (248370) устранить и для (6478) существенно уменьшить систематические отклонения в остаточных разностях. Были рассмотрены два варианта представления величины СФ: 1) его значение принято постоянным; 2) принята зависимость от гелиоцентрического расстояния как $1/r^2$. Оказалось, что для рассмотренных астероидов оба эти варианта практически равнозначны при оценке остаточных отклонений, что, вероятно, связано с незначительным изменением

гелиоцентрического расстояния на исследуемых интервалах: для (6478) – от 2.525 а. е. до 2.107 а. е., для (248370) – от 2.390 а. е. до 2.591 а. е.

Явление СФ учитывается, как правило, при редукации позиционных наблюдений комет, если в остаточных разностях обнаруживаются систематические отклонения. Впервые оно было учтено Buttner (1918) в наблюдениях кометы 1853 III $\equiv$ C/1853 L1 (Klinkerfues). Теоретическое обоснование этого явления дал Мохнач (1956), показавший, что центр изофот для комет смещен относительно центра тяжести в направлении к Солнцу. В работе (Medvedev, 1993) было показано, что в коме кометы вследствие сублимации кометного вещества может возникать эффект смещения центра яркости относительно ядра, т.е. реализовываться условия образования областей с повышенной плотностью пыли, где равнодействующая всех основных действующих на пылинку сил обращается в нуль. Показано также, что для комет центр яркости смещен в сторону Солнца. В Лаборатории реактивного движения NASA в настоящее время СФ включается в число определяемых параметров при уточнении орбит некоторых комет, например, для кометы 1P/Галлея его величина составляет 576 ± 27 км (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=1p, на 01.11.2023).

Наши результаты показывают, что этот эффект может присутствовать и в наблюдениях некоторых АА. Для рассмотренных нами АА (6478) и (248370) СФ, в отличие от комет, направлено в сторону от Солнца. Данный факт может указывать на то, что проявление активности этих астероидов вызвано скорее сбросом поверхностного слоя пыли в результате быстрого вращения (Jewitt и др., 2019; Jackson и др., 2021; Devogèle и др., 2021; Liu и др., 2021), чем сублимационной активностью, и объясняется тем, что выбрасываемая пыль под влиянием солнечного излучения движется в сторону, противоположную Солнцу.

Рассмотренные астероиды имеют схожие значения элементов орбит (эксцентриситеты около 0.2, перигелийные расстояния порядка 2 а. е.). В табл. 5 приводятся некоторые физические характеристики астероидов (6478) и (248370): значения диаметров, масс (при принятом значении плотности 2 г/см^3), периоды обращения, скорости пылевых частиц, значения радиусов сфер Хилла. Большинство этих параметров уже приводилось в статье со ссылками на соответствующие публикации. В последнем столбце приводятся значения модуля вектора смещения фотоцентра S_0 ($S_0^2 = R^2 + T^2 + N^2$).

Оцененное нами расстояние центра яркости от центра тяжести этих астероидов примерно соответствует размерам их сфер Хилла. Как следует из данных табл. 5, эти астероиды имеют

близкие размеры и периоды обращения, относительно небольшие скорости пылевых частиц, и, предположительно, одинаковую природу кометной активности.

Таблица 5. Некоторые физические параметры астероидов (6478) и (248370)

Астероид	Диаметр, км	Масса, кг	Период обращения, ч.	Скорость пылевых частиц, м/с	Радиус сферы Хилла, км	S_0 , км
(6478)	2.8(+0.4, -0.2) Принято 3.2	6.9×10^{13}	2.4929 ± 0.0003 2.55 ± 0.10	0.15 ± 0.05	790	985 ± 54
(248370)	3.6	9.8×10^{13}	2.7 ± 0.1 4.1 ± 0.1	1 ~0.05	1182	1145 ± 119

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для активных астероидов (6478) Голт и (248370) 2005 QN173/433P в остаточных разностях, (O–C), нами обнаружены систематические отклонения, совпадающие с периодами активности этих астероидов, проявляющейся в виде хвостов. Это означает, что в соответствующих позиционных наблюдениях может присутствовать такой эффект, как смещение фотоцентра, отклонение центра яркости от центра тяжести, который до настоящего времени был обнаружен только в наблюдениях некоторых комет.

Включение составляющих СФ по радиальному, трансверсальному и нормальному направлениям (R , T , N) в число определяемых параметров позволяет существенно уменьшить систематические отклонения для (6478) и полностью убрать их для (248370). Определенные нами значения компонент СФ составили для (6478): $R = 914 \pm \pm 39$ км, $T = -144 \pm 21$ км, $N = 172 \pm 14$ км, и для (248370): $R = 1145 \pm 119$ км. При этом центры яркости обоих АА смещены в сторону от Солнца, что свидетельствует в пользу предположения, объясняющего активность астероидов сбросом поверхностного вещества вследствие вращательной неустойчивости, а не сублимацией льдов, характерной для комет. Определяемые радиальные компоненты НУ малы и направлены в сторону Солнца, отражая ту же особенность в распределении наблюдений, что и СФ, однако их учет не дает заметного уменьшения систематических отклонений в наблюдениях данных астероидов.

Мы не утверждаем, что позиционные наблюдения всех активных астероидов нуждаются в редукции за СФ, но для некоторых из них такая поправка может потребоваться для наилучшего

представления наблюдений. Сравнение элементов орбит рассматриваемых астероидов, полученных без учета и с учетом СФ, показывает, что для (6478) значимыми оказались изменения значений наклона и долготы восходящего узла; для (248370) изменения всех элементов оказались незначимы.

Авторы благодарят анонимного рецензента за высказанные замечания и пожелания, учет которых значительно улучшил работу.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института прикладной астрономии РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохнач Д.О. Распределение видимой плотности в голове кометы и его влияние на определение элементов орбиты // Бюлл. ИТА. 1956. Т. 6. № 5. С. 269–311.

2. Buttner H. Die Bahn des Kometen 1853 III // Astron. Nachr. 1918. V. 207. P. 179–182.

3. Devogèle M., Ferrais M., Jehin E., Moskovitz N., Skiff B., Levine S., Gustafsson A., Farnocchia D., Micheli M., Snodgrass C., and 15 co-authors. (6478) Gault: Physical characterization of an active main-belt asteroid // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2021. V. 505. P. 245–258.

4. Chandler C., Kueny J., Gustafsson A., Trujillo C., Robinson T., Trilling D. Six years of sustained activity from active asteroid (6478) Gault // Astrophys. J. Lett. 2019. V. 877. id. L12.

5. Chandler C.O., Trujillo C.A., Hsieh H. Recurrent activity from active asteroid (248370) 2005 QN₁₇₃:

- A main-belt comet* // *Astrophys. J. Lett.* 2021. V. 922. id. L8.
6. Hsieh H., Chandler C.O., Denneau L., Fitzsimmons A., Erasmus N., Kelley M.S.P., Knight M.M., Lister T.A., Pittichová J., Sheppard S.S., and 10 co-authors. Physical characterization of Main-belt comet (248370) // *Astrophys. J. Lett.* 2021. V. 922. id. L9 (10 p.).
 7. Hui Man-To, Jewitt D. Non-gravitational acceleration of the active asteroids // *Astron. J.* 2017. V. 153. id. 80 (9 p.).
 8. Hui Man-To, Kim Y., Gao X. New active asteroid (6478) Gault // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. Lett.* 2019. V. 488. № 1. P. L143–L148.
 9. Jackson P.M., Nakano R., Kim Y., Hirabayashi M. Active Main-belt asteroid (6478) Gault – Constraint on its cohesive strength and the fate of ejected particles in the Solar System // <https://arxiv.org/pdf/2112.11582.pdf>. 2021. 14 pp.
 10. Jewitt D. The Active Asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. № 3. id. 66. (14 p.).
 11. Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J. The Active Asteroids // *Asteroids IV* / Eds: Michel P., DeMeo F., Bottke W. Univ. Arizona, 2015. P. 221–241.
 12. Jewitt D., Kim Y., Luu J., Rajagopal J. Episodically active asteroid 6478 Gault // *Astrophys. J. Lett.* 2019. V. 876. № 2. id. L19.
 13. Everhart E.A. Implicit single sequence methods for integrating orbits // *Celest. Mech.* 1974. V. 10. P. 35–55.
 14. Lister T., Kelley M.S.P., Holt C.E., Hsieh H.H., Bannister M.T., Verma A.A., Dobson M.M., Knight M.M., Moulane Y., Schwamb M.E., and 25 co-authors. The LCO outbursting objects key project: Overview and year 1 status // *Planet. Sci. J.* 2022. V. 3. № 7. P. 173.
 15. Luu J., Jewitt D., Mutchler M., Weaver H.A. Rotational mass shedding from asteroid (6478) Gault // *Astrophys. J. Lett.* 2021. V. 910. id. L27.
 16. Marsden B.G., Sekanina Z., Yeomans D.K. Comets and nongravitational forces. V // *Astron. J.* 1973. V. 78. P. 211.
 17. Medvedev Yu.D. Dust cloud in the comet head and its possible connection to the photocentre shift phenomenon // *Proc. Second Int. Workshop on Positional Astronomy and Celestial Mechanics held at Valencia. Spain, 1993.* P. 106–117.
 18. Moreno F., Jehin E., Licandro J., Ferrais M., Moulane Y., Pozuelos F.J., Manfroid J., Devogèle M., Benkhaldoun Z., Moskovitz N., and 4 co-authors. Dust properties of double-tailed active asteroid (6478) Gault // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 624. id. L14.
 19. Novakovic B., Pavela D., Hsieh H.H., Marceta D. Photometric and dynamic characterisation of active asteroid (248370) 2005QN173 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2022. V. 516. P. 757–765.
 20. Park R.S., Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H. The JPL planetary and lunar ephemerides DE440 and DE441 // *Astron. J.* 2021. V. 161. P. 105–119.
 21. Purdum J.N., Lin Z.-Yi, Bolin B.T., Sharma K., Choi P.I., Bhalerao V., Hanuš J., Kumar H., Quimby R., van Roestel J.C., and 42 co-authors. Time-series and phase-curve photometry of the episodically active asteroid (6478) Gault in a quiescent state using APO, GROWTH, P200, and ZTF // *Astrophys. J. Lett.* 2021. V. 911. № 2. id. L35 (16 p.).
 22. Vereš P., Farnocchia D., Chesley S.R., Chamberlin A.B. Statistical analysis of astrometric errors for the most productive asteroid surveys // *Icarus.* 2017. V. 296. P. 139–149.