

УДК 521.1, 521.182

DOI: 10.17223/00213411/63/11/141

*С.А. ГУРЬЯНОВ, Т.Ю. ГАЛУШИНА***ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АСТЕРОИДА КАМО`OALEWA ***

Исследовано движение астероида (469219) Камо`oalewa, который движется в орбитальном резонансе 1:1 с Землей. В ходе изучения динамики объекта выявлены сближения с планетами Солнечной системы, орбитальные и вековые резонансы, получены оценки хаотичности его орбиты. Особенностью движения рассматриваемого астероида являются его регулярные переходы из состояния квазиспутника в состояние «подковы».

Ключевые слова: астероид, (469219) Камо`oalewa, вековые резонансы, орбитальные резонансы, орбитальная эволюция, MEGNO.

Введение

Астероид (469219) Камо`oalewa (предварительное обозначение 2016 HO3), обнаруженный в 2016 г., движется в орбитальном резонансе 1:1 с Землей и в настоящее время входит в ряд квазиспутников нашей планеты, но его состояние неоднократно переключается между конфигурациями квазиспутника и «подковы». Сегодняшнее квазиспутниковое состояние объекта началось почти 100 лет назад и закончится примерно через 300 лет [1].

Объект был открыт с помощью гавайского автоматического телескопа Pan-STARRS 1 (PS1) системы Pan-STARRS астрономом Полом Чодасом из лаборатории реактивного движения НАСА в Пасадене (США). После открытия Пол Чодас с коллегами продолжают исследовать астероид, чтобы по составу определить его дальнейшее существование.

Цель данной работы – рассмотреть динамику астероида (469219) Камо`oalewa, в частности выявить сближения с планетами, оценить хаотичность данного объекта, а также исследовать орбитальные и вековые резонансы.

В первом пункте кратко рассказывается об этапах исследования объекта и представлены методы исследований. Во втором пункте рассматриваются результаты улучшения орбиты астероида. В третьем представлена информация об исследовании вероятностной орбитальной эволюции. Четвертый пункт посвящен исследованию хаотичности орбиты объекта, а пятый – вековым резонансам.

1. Методика исследования

Исследование динамики астероида (469219) Камо`oalewa включало следующие этапы:

- изучение и анализ влияния различных возмущающих факторов на движение астероида;
- улучшение орбиты астероида;
- исследование вероятностной орбитальной эволюции, в частности выявление и исследование сближений и орбитальных резонансов;
- исследование хаотичности движения;
- выявление вековых резонансов.

Первым шагом в исследовании динамики астероидов являлся анализ влияния различных возмущающих факторов на движение астероида [2]. В данной работе набор оцениваемых возмущений включал в себя влияние больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты; сжатия Солнца, Земли и Юпитера; релятивистских эффектов от Солнца, больших планет, Плутона и Луны. В результате проведенного исследования выявлено, что наиболее значимое влияние на динамику 2016 HO3 оказывают гравитационные силы Земли, Луны, больших планет и релятивистские эффекты от Солнца.

Изучение эволюции орбиты астероида Камо`oalewa проведено путем численного интегрирования дифференциальных уравнений движения. Интервал времени исследования выбран на основании точности вычислений, мы рассматривали время на 8000 лет в будущее и на столько же в прошлое. Была рассмотрена эволюция элементов номинальной орбиты (полученной в результате

* Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

улучшения орбиты методом наименьших квадратов), а также тестовых частиц, распределенных по нормальному закону в пределах начальной доверительной области.

В качестве характеристик для орбитальных резонансов использовались критический (резонансный) аргумент β , определяющий долготу соединения астероида и планеты [3],

$$\beta = \lambda_1 - \lambda_2, \quad (1)$$

и его производная по времени α (называемая резонансной «щелью» [4])

$$\alpha \approx n_1 - n_2, \quad (2)$$

где n_1, n_2 – средние движения; λ_1, λ_2 – средние долготы астероида и планеты соответственно; ω_1 – аргумент перицентра астероида; Ω_1 – долгота восходящего узла астероида.

Для выявления хаотичности движения применялся параметр MEGNO, который представляет собой взвешенную по времени интегральную форму ляпуновского характеристического числа. Если записать систему уравнений движения небесного тела для случая прямоугольных координат и скоростей как $\mathbf{q} = \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}$ – вектор состояния исследуемого астероида, то уравнение движения объекта будет выглядеть так:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{q}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{q}(t), \gamma), \quad (3)$$

где γ – вектор параметров модели сил.

Обозначив начальное малое отклонение вектора состояния \mathbf{q} через $\delta(t_0) = \delta_0$, ляпуновское характеристическое число (LCN) запишем в виде

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\delta(t)\|}{\|\delta(t_0)\|}$$

и в интегральной форме

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t \frac{\dot{\delta}(s)}{\delta(s)} ds.$$

Параметр MEGNO $Y(t)$ представляет собой взвешенную по времени интегральную форму LCN

$$Y(t) = \frac{2}{t} \int_0^t \frac{\dot{\delta}(s)}{\delta(s)} s ds,$$

а его усредненная величина $\bar{Y}(t)$ вычисляется как

$$\bar{Y}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t Y(s) ds.$$

Эволюция $\bar{Y}(t)$ во времени позволяет точно разделить регулярный и хаотический режимы движения [5]. Так, например, для хаотических орбит с экспоненциальным расхождением близких траекторий $\bar{Y}(t) > 2$. Для квазипериодических (регулярных) орбит с линейным расхождением близких траекторий $\bar{Y}(t)$ осциллирует около 2.

Проводилась также работа по выявлению апсидально-нодальных резонансов для изучаемого объекта. Под апсидально-нодальным резонансом обычно понимают соизмеримость, возникающую между скоростями прецессий орбит астероида и планеты $(\dot{\omega}, \dot{\omega}', \dot{\Omega}, \dot{\Omega}')$ [6–8].

Представив аргумент возмущающей функции для двукратно осредненной ограниченной задачи трех тел в виде $\psi = (l - 2p')\omega' - (l - 2p)\omega - m(\Omega - \Omega')$, где ω, Ω – аргумент перицентра и долгота восходящего узла астероида; ω', Ω' – аргумент перицентра и долгота восходящего узла третьего тела; l', p', l, p, m – целые числа; t, t_0 – текущий и начальный моменты времени. Условие возникновения резонанса можно записать в следующем виде: $\dot{\psi} = 0$.

Вековые ускорения в движении астероида определяются влиянием третьего тела и вычисляются в процессе численного интегрирования по формулам производной от многочлена Лагранжа. Полный набор апсидально-нодальных резонансных соотношений до шестого порядка приведен в табл. 1.

Все описанные алгоритмы ранее были реализованы в программном комплексе ИДА [9], который использовался для проведения исследований в данной работе.

Таблица 1

Типы апсидально-нодальных резонансных соотношений низких порядков

№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения
1	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$	8	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$	15	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega}'_j$
2	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$	9	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega}$	16	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega}'_j$
3	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$	10	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega}$	17	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j)$
4	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_j$	11	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega}$	18	$\dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$
5	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$	12	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega}$	19	$\dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$
6	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$	13	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega}'_j$	20	$\dot{\omega}$
7	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_j$	14	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega}'_j$		

2. Улучшение орбиты

На рис. 1 представлена проекция орбиты (469219) Камо`оалева и Земли на плоскость эклиптики в системе координат, вращающейся с угловой скоростью нашей планеты, (а) и в неподвижной системе координат (б). Видно, что орбиты и периоды астероида и Земли близки, можно также отметить, что в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Земли, изучаемый объект описывает траекторию, характерную для квазиспутника.

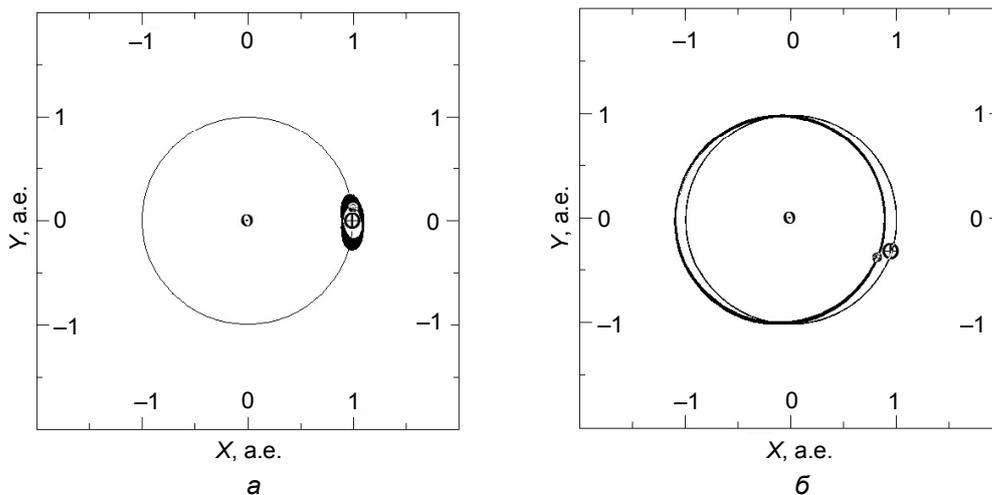


Рис. 1. Проекция орбиты астероида (469219) Камо`оалева и Земли на плоскость эклиптики в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Земли, (а) и в неподвижной системе координат (б)

Результаты улучшения орбиты приведены в табл. 2, где N – число наблюдений, Δt – интервал наблюдений в сутках, t_0 – начальная эпоха, σ – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений в угловых секундах, Δr – размер начальной доверительной области. В результате улучшения орбиты из общего числа было исключено четыре наблюдения по правилу «трех сигм». В табл. 2 также представлены элементы орбиты, полученные в результате улучшения: большая полуось a , эксцентриситет e , наклонение плоскости орбиты к эклиптике i . Полученное значение Δr показывает, что орбита астероида хорошо определена.

Таблица 2
Данные о наблюдениях и результатах улучшения орбиты Камо`оалева

Параметр	Значение
N	80(-4)
Δt	17.03.2004 – 10.06.2016
t_0	06.08.2015
$\sigma, ''$	0.208
$\Delta r, \text{a.e.}$	$2.66 \cdot 10^{-7}$
$a, \text{a.e.}$	1.0011132
e	0.1042788
$i, \text{град}$	7.76820582

3. Исследование вероятностной орбитальной эволюции

Для исследования вероятностной орбитальной эволюции в рамках начальной доверительной области было смоделировано 10 000 тестовых частиц, распределенных по нормальному закону. Эволюция орбиты каждой частицы исследовалась численно с учетом влияния Земли, Луны, больших планет и релятивистских эффектов от Солнца.

На рис. 2 представлены сближения астероида с Землей, эволюция резонансных характеристик и элементов орбиты. На графиках можно увидеть, что значения элементов меняются незначительно на всем промежутке исследования, что указывает на регулярность орбиты объекта. Можно также отметить, что значения элементов орбиты испытывают наибольшие изменения во время сближений с Землей.

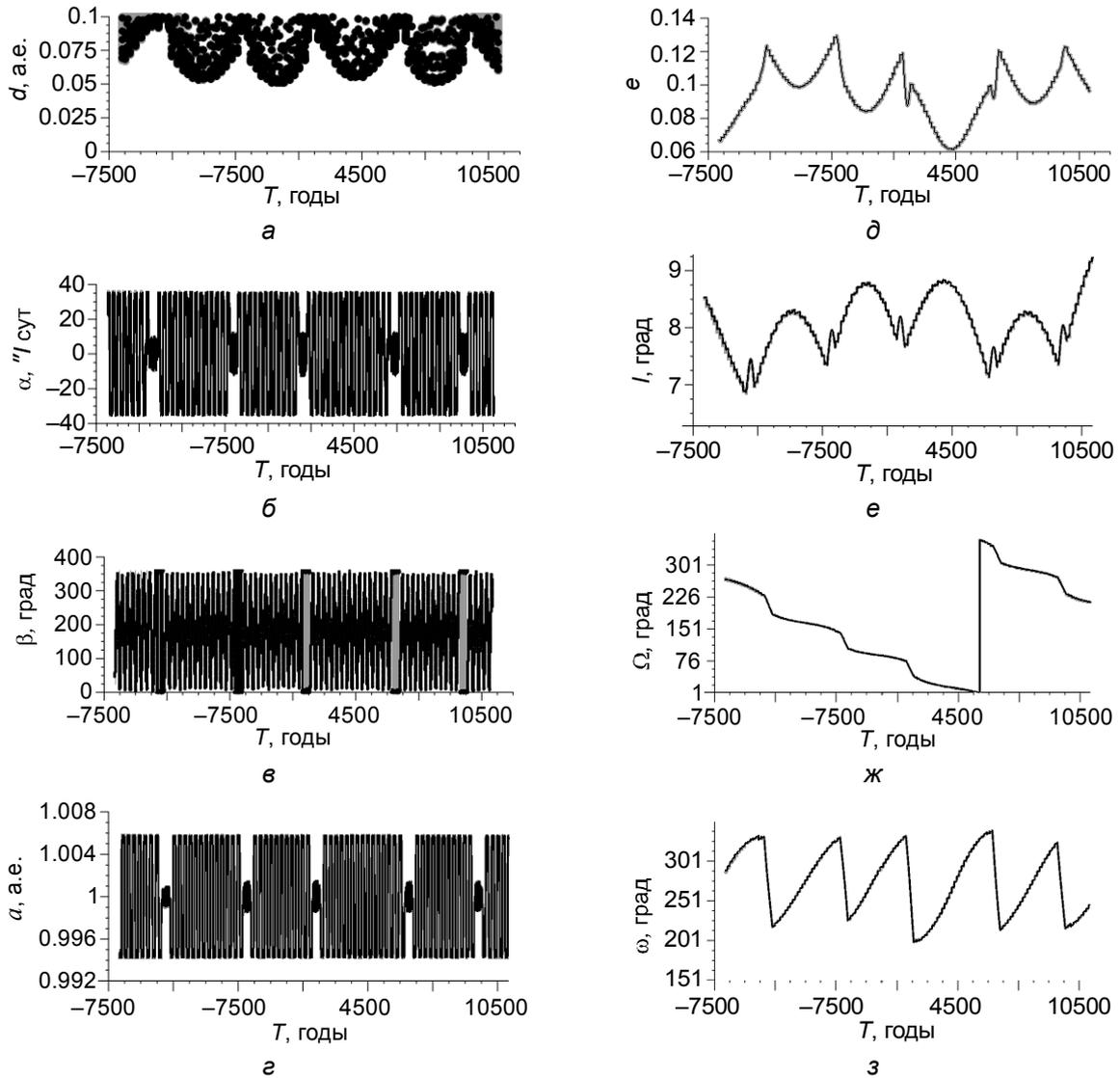


Рис. 2. Сближения астероида (469219) Камо`оалева с Землей (*a*) (*d* – расстояние от исследуемого объекта до центра планеты); эволюция резонансной щели α (*b*), критического аргумента β (*c*), большой полуоси *a* (*d*), эксцентриситета *e* (*d*), наклона плоскости орбиты к эклиптике *i* (*e*), долготы восходящего узла Ω (*ж*) и аргумента перигелия ω (*з*). Серым фоном показана эволюция для тестовых частиц, черным выделена эволюция для номинальной орбиты

Сближения астероида с Землей присутствуют на всем интервале исследования, однако расстояние до Земли меняется. Резонансная щель колеблется около нуля с небольшой амплитудой, но при тесных сближениях амплитуда увеличивается. Критический аргумент либрирует около нуля, что в настоящее время говорит о принадлежности астероида к классу квазиспутников Земли, на графике также видно, что спустя примерно 300 лет значение характеристики изменится в сто-

рону повышения амплитуды колебаний и смены их центра, что повлечет за собой переход объекта в класс «подков». Из рис. 2 видно, что данные переходы между квазиспутником и «подковой» у объекта регулярно повторяются на всем интервале исследования. Кроме того, для большей наглядности нами была подробно рассмотрена эволюция критического аргумента и резонансной щели в окрестности текущей эпохи, когда астероид является квазиспутником Земли. Результат продемонстрирован на рис. 3.

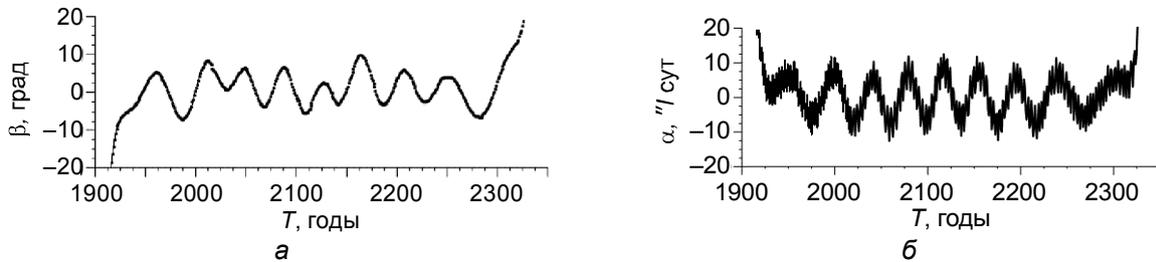


Рис. 3. Эволюция критического аргумента (а) и резонансной щели астероида (б) на интервале времени (1900, 2350 гг.)

При исследовании орбитальной эволюции номинальной орбиты и тестовых частиц было выявлено, что доверительная область сохраняет свою конфигурацию со временем, расхождение тестовых частиц от номинальной орбиты практически незаметно, что свидетельствует о стабильном поведении объекта.

4. Исследование хаотичности

На рис. 4 показана эволюция усредненного параметра MEGNO. Видно, что MEGNO изменяется незначительно и меньше значения $\bar{Y}(t)=2$ практически на всем интервале исследования, т.е. орбита может рассматриваться как регулярная.

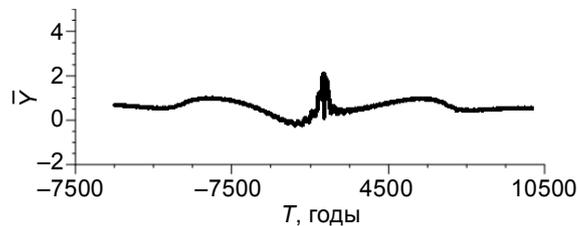


Рис. 4. Эволюция параметра MEGNO для астероида (469219) Камо`оалева

5. Исследование вековых резонансов

Мы рассмотрели апсидально-нодальные резонансы со всеми планетами (табл. 1), однако приведем примеры только с Землей, так как у данного объекта наблюдается схожая картина с точки зрения поиска вековых резонансов с планетами внутренней группы. Рассматривая все 20 резонансов на исследуемом интервале времени, можем заметить, что в каком-то случае аргумент совершает либрационные движения (соотношения 13–19), а в остальных соотношениях наблюдается циркуляция. Все резонансные соотношения колеблются около нуля, но с разной амплитудой. В момент тесных сближений объекта с Землей амплитуда резонансного соотношения возрастает, но резонанс сохраняется. На основании данных результатов можно сделать вывод, что резонанс является устойчивым в момент либрации резонансного аргумента, однако в случае его циркуляции наблюдается другая картина.

На рис. 5 представлены только некоторые примеры эволюции апсидально-нодальных резонансных соотношений низких порядков и эволюция соответствующих им резонансных аргументов для астероида Камо`оалева. Здесь присутствует и циркуляция, и либрация.

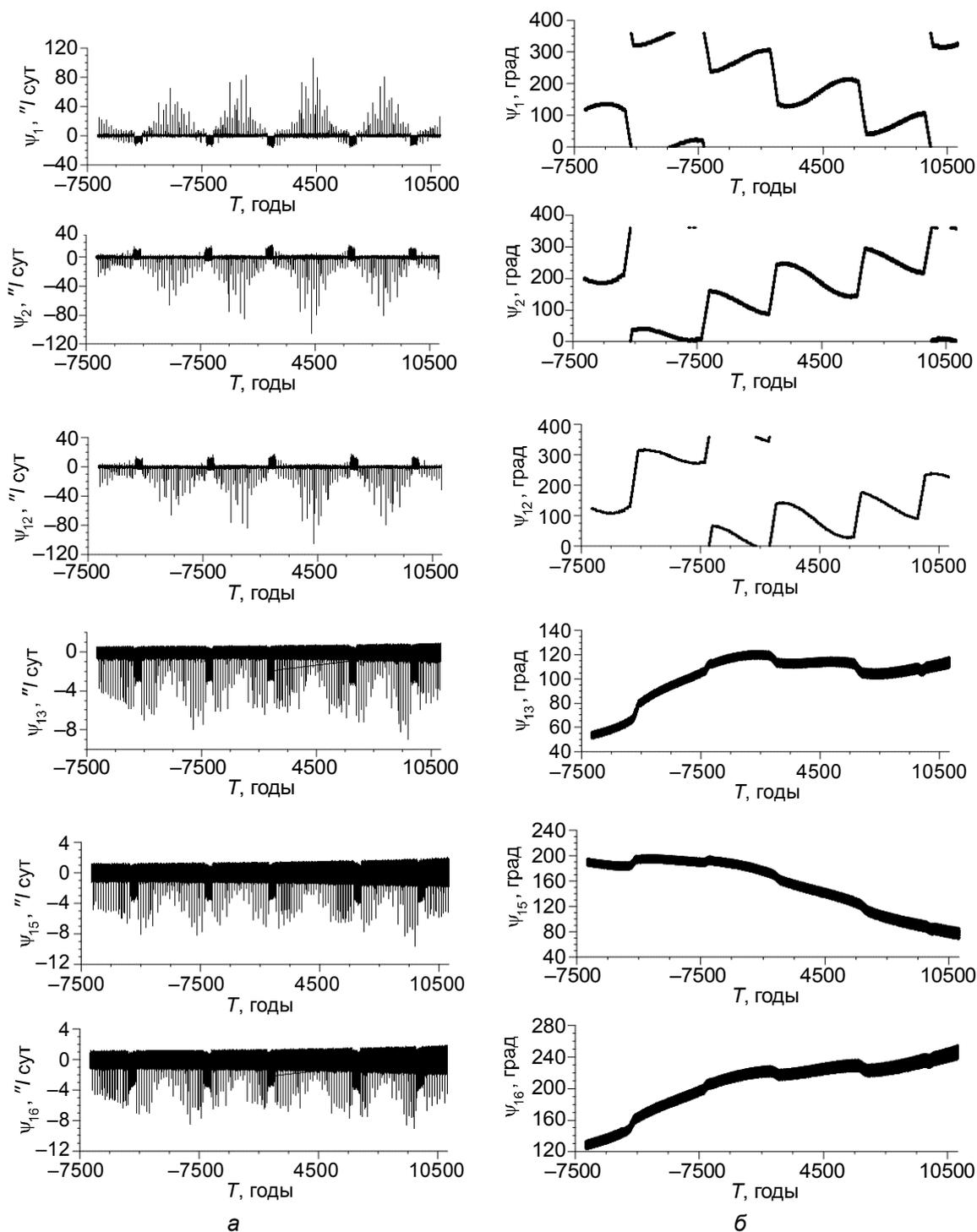


Рис. 5. Эволюция резонансных соотношений (а) и соответствующих им резонансных аргументов (б) для астероида (469219) Камо`оалева

Заключение

Рассмотрена орбитальная эволюция астероида (469219) Камо`оалева, который в настоящее время входит в ряд квазиспутников нашей планеты и на основании вычислений пробудет в этом состоянии еще около 300 лет.

Анализируя исследования эволюции параметров орбиты астероида и хаотичности движения, можем сказать, что орбита объекта будет устойчивой в течение еще как минимум 8000 лет.

Исследование также показало наличие сближений астероида с Землей, но не настолько тесных, чтобы считать объект опасным для нашей планеты, а рассматривая резонансные характери-

стики объекта, мы подтвердили тот факт, что объект действительно движется в резонансе 1:1 с Землей и является квазиспутником Земли.

Резонансные аргументы для некоторых апсидально-нодальных резонансных соотношений низких порядков либрируют на рассматриваемом интервале времени (соотношения 13–19 из табл. 1), что свидетельствует об устойчивости вековых резонансов для изучаемого объекта, однако для остальных соотношений наблюдается циркуляция, что говорит об отсутствии резонанса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De la Fuente Marcos C. and de la Fuente Marcos R. // *MNRAS*. – 2016. – V. 462. – P. 3441–3456.
2. Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю. // *Изв. вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. – № 6/3. – С. 229–231.
3. Мюррей К., Дермотт С. *Динамика Солнечной системы*. – М.: Физматлит, 2009. – 588 с.
4. Гребеников Е. А., Рябов Ю. А. *Резонансы и малые знаменатели в небесной механике*. – М.: Наука, 1978. – 128 с.
5. Cincotta P. M., Girdano S. M., and Simo C. // *Physica D*. – 2003. – V. 182. – P. 151–178.
6. Бордовицына Т. В., Томилова И. В., Чувашов И. Н. // *Астрон. вестник*. – 2012. – Т. 46. – № 5. – С. 356–368.
7. Galushina T. Yu. and Sambarov G. E. // *Planetary and Space Science*. – 2017. – V. 142. – P. 38–47.
8. Александрова А. Г., Бордовицына Т. В., Попандопуло Н. А., Томилова И. В. // *Изв. вузов. Физика*. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 57–62.
9. Galushina T., Vykova L., Letner O., and Baturin A. // *Astronomy and Computing*. – 2019. – V. 29. – id. 100301.

Поступила в редакцию 22.05.2020.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Гурьянов Сергей Александрович, аспирант НИ ТГУ, e-mail: magicboys2000@gmail.com;
Галушина Татьяна Юрьевна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. НИ ТГУ, e-mail: volna@sibmail.com.