

УДК 521.1:523.4

ЭФЕМЕРИДЫ СПУТНИКОВ АСТЕРОИДОВ И ОЦЕНКА ИХ ТОЧНОСТИ

© 2022 г. Н. В. Емельянов^{a, b, *}, J.-E. Arlot^b, D. Hestroffer^b,
М. И. Варфоломеев^a, А. С. Бескакотов^c

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

^bПарижская обсерватория, Институт небесной механики и вычисления эфемерид,
Париж, Франция

^cСпециальная астрофизическая обсерватория РАН,
Нижний Архыз, Россия

*e-mail: emelia@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 22.03.2022 г.

Принята к публикации 03.04.2022 г.

Статья представляет новые результаты по моделированию движения и созданию эфемерид спутников астероидов на основе наблюдений. В предыдущих работах по проекту были построены эфемериды 62 спутников. С тех пор открыты новые спутники астероидов и опубликованы новые наблюдения. В статье даются найденные из наблюдений орбитальные параметры четырех новых спутников. Сообщается об обновлении эфемерид спутников на основе новых наблюдений. Важной и необходимой характеристикой эфемерид является их точность. В настоящей работе показано, как делаются оценки точности эфемерид, даны примеры оценок. Выявлено важное обстоятельство: для большого числа спутников точность эфемерид деградировала к настоящему времени настолько, что эфемериды стали практически непригодными. Имеется острая необходимость новых наблюдений спутников астероидов.

Ключевые слова: спутники астероидов, астероиды, наблюдения, эфемериды

DOI: 10.31857/S0320930X22050024

ВВЕДЕНИЕ

Эфемериды являются основным результатом изучения динамики спутников астероидов, поскольку они основаны на всех наших методах и знаниях, включая все имеющиеся наблюдения. Эфемериды в то же время являются основным инструментом дальнейших исследований. Они нужны для планирования новых наблюдений и проверки результатов. Эфемериды позволяют определять взаимное расположение объектов на любые моменты в будущем и прошлом. С их помощью можно вычислять заранее моменты и обстоятельства взаимных покрытий и затмений в системах астероидов со спутниками, чтобы организовать и провести фотометрические наблюдения этих явлений. Из таких наблюдений получаются дополнительные данные о взаимных положениях спутника и астероида.

В предшествующей работе (Emelyanov, Drozdov, 2020) методом наименьших квадратов на основе всех опубликованных наблюдений определены параметры орбит 62 спутников астероидов. В работе (Emelyanov, Drozdov, 2021) сообщается о со-

здании сервера эфемерид спутников астероидов, который обеспечивает вычисление эфемерид на любые моменты времени путем запроса на странице интернета. Сервер имеет широкие возможности по типам выводимой информации.

Имелись две существенные причины для подготовки этой статьи. Первая причина состоит в том, что наблюдений спутников астероидов мало, выполнены они на коротких интервалах времени, распределены весьма неравномерно по орбите и во времени. Точность эфемерид оказывается весьма низкой и сильно деградирует со временем. Мы выполнили оценки точности эфемерид всех спутников астероидов, включенных в сервер эфемерид. В данной статье приведены и обсуждаются оценки точности.

Вторая причина заключается в том, что с течением времени открываются новые спутники, публикуются новые наблюдения. Необходимо определять орбиты и обновлять сервер эфемерид. С момента публикации наших предыдущих работ мы дополнительно определили орбиты четырех спутников. В настоящей статье мы приводим полу-

ченные из наблюдений значения параметров и оценки их точности.

Всякий раз, когда определяются параметры орбит, делается также оценка точности этих параметров. Однако оценок точности параметров недостаточно, чтобы найти точность эфемерид. Нужна дополнительная информация.

В работе (Emelyanov, 2010) протестированы три способа оценки точности эфемерид. Для первого из них нужны все имеющиеся наблюдения спутника. В этом методе фактически много раз повторяется определение орбит и вычисляются эфемериды на основе наблюдений в процессе вариаций ошибок наблюдений. Этот первый метод универсальный. Он применим во всех случаях.

Во втором методе для получения оценок точности наблюдения не нужны, но используется ковариационная матрица ошибок параметров, которая получилась при определении параметров из наблюдений. Даются случайные вариации параметров. Это приводят к вариациям эфемериды. Этот второй метод может применяться в том случае, когда параметры определяются методом наименьших квадратов.

В третьем методе нужен исходный набор наблюдений. Из этого набора делаются случайные выборки методом “bootstrap”. Для каждой выборки заново определяются параметры орбиты и эфемериды. Метод “bootstrap” выборок дает неудовлетворительный результат, когда наблюдений мало. Это как раз случай наблюдений спутников астероидов.

В любом из этих методов на каждый заданный момент времени получается большой набор возможных значений координат спутников. Статистические параметры этих значений дают нам оценку точности эфемерид.

Поскольку мы определяем методом наименьших квадратов орбиты спутников астероидов, в нашем распоряжении оказываются ковариационные матрицы ошибок параметров. Мы применяли второй из трех описанных выше способов оценки точности эфемерид. В настоящей статье описываются полученные оценки.

Нужно обратить внимание на то, что в применяемых методах предполагается локальная линейная зависимость измеряемых величин от определяемых параметров. В этих условиях оценки точности, сделанные применяемым методом, могут дать более оптимистичные результаты по сравнению с реальными обстоятельствами, которые нам неизвестны. В работах (Avdyushev, 2011; Баньщикова и др., 2021) исследуются последствия принятия предположения о вышеуказанной линейности, рассматриваются методы оценки нелинейности. В большинстве случаев для оценивания точности эфемерид вполне можно пользоваться

линейными оценками на основе ковариационных матриц, что мы и делали в нашей работе.

При создании сервера эфемерид спутников астероидов заранее предполагалось, что будут открываться новые спутники, будут появляться в публикациях новые результаты астрометрических наблюдений. Это требует постоянного обновления сервера эфемерид. По сравнению с предыдущей работой, к настоящему времени в сервер добавлены 4 новых спутника и обновлены эфемериды некоторых других спутников. Все эти добавления описаны в настоящей статье.

Отметим, что мы поддерживаем, сопровождаем и обновляем базу данных опубликованных наблюдений (Емельянов и др., 2018). База данных доступна в интернете по адресам <http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/obspos/babine.htm> или <http://nsdb.imcce.fr/obspos/babine.htm>

Мы помещаем обнаруженные наблюдения в эту базу данных. Ниже мы ссылаемся на порции наблюдений в этой базе данных.

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОЦЕНОК ОШИБОК ЭФЕМЕРИД

Нет очевидного самого подходящего способа представления точности эфемерид. Согласно описанному выше методу, положение спутника на заданный момент эфемериды варьируется в пространстве. Соответственно, мы имеем вариации двух топоцентрических угловых координат.

Орбитальная долгота λ спутника зависит от времени t линейно

$$\lambda = n(t - t_0) + \lambda_0,$$

n — постоянная угловая скорость изменения долготы, λ_0 — значение долготы в начальный момент времени t_0 . Вариации параметра n приводят к вариациям долготы λ . При этом вариации долготы приблизительно линейно возрастают со временем. Таким образом, ошибки координат спутника вдоль траектории движения возрастают со временем. Вариации координат поперек траектории не обладают таким свойством. Поэтому необходимо вычислять отдельно ошибки эфемериды вдоль и поперек траектории.

Сначала описанным способом определяется ошибка топоцентрического положения спутника относительно главной компоненты, выраженная в секундах дуги. Однако такая оценка не дает правильного представления о точности эфемериды.

Дело в том, что размеры видимых на небе орбит спутников могут быть разными. При этом размеры изменяются со временем. Нас интересует ошибка видимого положения спутника, выраженная относительно большой полуоси орбиты. Мы вычисляли каждое видимое отклонение эфемеридного положения спутника отдельно вдоль и

поперек видимой траектории и выражали отклонение относительно большой полуоси орбиты. Затем по этим отклонениям отдельно определяли статистические параметры отклонений, т.е. ошибки эфемерид вдоль и поперек траектории, выраженные в значениях большой полуоси орбиты.

Очевидно, что так вычисленная ошибка эфемериды спутника возрастает со временем. То есть точность эфемериды деградирует. Мы делали оценки точности эфемериды для моментов времени от момента первого наблюдения до 1 января 2025 г. Если потребуется, интервал времени можно продлить.

Ошибка эфемериды выбранного спутника со временем может достигнуть размера орбиты. Тогда можно считать спутник потерянным, и даже неизвестно, с какой стороны от главной компоненты он находится. Спутник нужно открывать заново. Хорошо еще, что он недалеко улетит от своего астероида.

При больших ошибках эфемериды невозможно достоверно вычислить моменты и обстоятельства взаимных покрытий и затмений спутника и астероида. При этом неясно, как оценивать точность предвычисленных моментов явлений. Вероятность того, что явление состоится, трудно оценить.

Ошибка эфемериды можно представить в виде таблицы или графика, где ошибка дается для ряда моментов времени. Если моменты задать с малым шагом по времени, то таблица может оказаться слишком большой. Если шаг по времени имеет величину периода обращения спутника, то невозможно проследить, как ошибка изменяется на одном обороте. Мы приняли следующий порядок выбора моментов времени для эфемерид. Сначала точки моментов следуют в пределах одного оборота спутника с шагом, равным $1/20$ или $1/40$ от периода обращения, т.е. 20–40 точек на одном периоде. Далее делается заданный скачок по времени, и снова моменты следуют внутри одного оборота с малым шагом, как указано выше. Так отслеживается изменение точности эфемериды внутри периода обращения спутника и показывается изменение ошибки на большом интервале времени в несколько лет.

Есть спутники с очень большим периодом обращения. В таких случаях моменты оценки точности эфемерид следуют по всему интервалу с постоянным небольшим шагом.

Наблюдения, из которых получены модели движения спутников астероидов, обладают значительными погрешностями. Наблюдений мало. Интервалы времени наблюдений для некоторых спутников весьма малы. Эти обстоятельства приводят к большим ошибкам в получаемых эфемеридах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ЭФЕМЕРИД СПУТНИКОВ АСТЕРОИДОВ

Мы получили оценки точности эфемерид всех спутников астероидов, для которых определены параметры орбит. Ошибки эфемерид представлены в виде таблиц и графиков. Это весьма обширный материал. Его невозможно весь представить в данной статье. Поэтому мы предоставили доступ к таблицам и графикам для всех спутников через наш сервер эфемерид по адресам <http://nsdb.imcce.fr/multisat/nssAsthe.htm> или <http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/multisat/nssAsthe.htm>. Там при любой операции с эфемеридами выбранного спутника на странице появится ссылка на таблицу и ссылка на график, показывающие оценки точности эфемерид.

Здесь приведем примеры этих данных и дадим некоторые комментарии.

Рассмотрим пример изменения во времени погрешности эфемериды спутника Remus астероида (87) Sylvia. На рис. 1 показано изменение погрешности на интервале времени с февраля 2001 г. до 1 января 2025 г. Погрешность определена как среднеквадратичная величина случайных отклонений относительных положений спутника вдоль видимой траектории и выраженных в долях большой полуоси орбиты. Жирной линией на оси показан интервал времени наблюдений, использованных для определения орбиты. На графике видно, что на интервале времени наблюдений погрешность эфемериды соответствует точности наблюдений. Далее погрешность возрастает примерно линейно во времени. Точки графика, принадлежащие одной вертикали, показывают изменение погрешности на интервале времени в один оборот спутника. Для определения орбиты использовались 25 измеренных положений спутника на интервале времени примерно 11 лет. При этом одно наблюдение было сделано 23 февраля 2001 г., а следующее только 10 августа 2004 г. Такой отскок первого наблюдения во времени выразился в возрастании погрешности эфемериды в начале 2001 г. Из показанного анализа следует, что эфемериду спутника Remus астероида (87) Sylvia можно считать достоверной. Погрешность вычисленных положений к 2025 г. не превышает 0.1 от большой полуоси орбиты.

Рассмотрим теперь изменение во времени погрешности эфемериды спутника Pichi астероида (702) Alauda. На рис. 2 показано изменение погрешности на интервале времени с 26 августа 2007 г. до 1 января 2025 г. Погрешность определена на описанном выше способом. Жирной линией на оси показан интервал времени наблюдений, использованных для определения орбиты. На графике видно, что на интервале времени наблюдений погрешность эфемериды составляет около 0.02 от величины большой полуоси орбиты. Далее

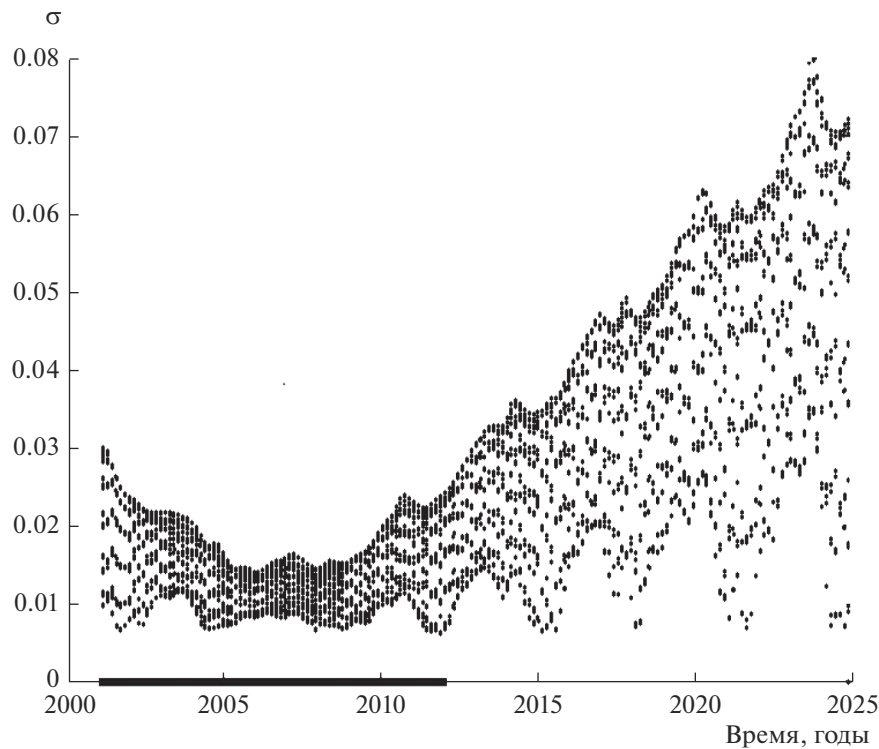


Рис. 1. Изменения во времени погрешности эфемериды спутника Remus астероида (87) Sylvia. Погрешность σ определена как среднеквадратичная величина случайных отклонений относительных положений спутника вдоль видимой траектории и выраженных в долях большой полуоси орбиты. Жирной линией на оси показан интервал времени наблюдений, использованных для определения орбиты.

по времени погрешность быстро возрастает. К 2015 г. погрешность вычисленных положений спутника имеет примерно величину большой полуоси орбиты. Это означает, что эфемерида с 2015 г. становится недостоверной. Причина такой погрешности – весьма малый интервал времени наблюдений, 50 суток, на которых основано определение орбиты. Конечно, предсказание взаимных покрытий и затмений в этой системе оказывается невозможным.

Таблица 1. Максимальные погрешности эфемерид некоторых спутников астероидов в течение заданных годов. Величины погрешностей вычислены вдоль видимых траекторий спутников на небе и выражены в долях большой полуоси орбиты

Астероид	Спутник	2023 г.	2024 г.	2025 г.
(22) Kalliope	Linus	0.00561	0.00576	0.00584
(31) Euphrosyne	S/2019(31)1	1.21236	0.95923	1.14169
(41) Daphne	Peneius	0.02031	0.02350	0.02427
(317) Roxane	Olympias	0.07761	0.07950	0.09219
(617) Patroclus	Menoetius	0.01389	0.01474	0.01555
(3548) Eurybates	Queta	0.25572	0.31757	0.42476

Еще один пример на рис. 3 показывает изменение со временем погрешности эфемериды спутника астероида 2000 CF105, который имеет очень большой орбитальный период 3979.676 сут., т.е. примерно 11 лет. Моменты времени для оценки точности эфемерид здесь следуют с шагом 63 сут.

Мы составили таблицу погрешностей эфемерид всех 66 спутников для 2023, 2024 и 2025 гг. В таблице даны максимальные значения погрешностей в течение каждого из этих годов. Погрешности определены как среднеквадратичные величины случайных отклонений относительных положений спутника вдоль видимой траектории и выраженных в долях большой полуоси орбиты. Для тех спутников, эфемериды которых не были обновлены, часть той таблицы, т.е. оценки точности, можно взять из публикации (Emelyanov, Drozdov, 2021). Для новых спутников и спутников с обновленными эфемеридами фрагмент этой таблицы мы даем здесь в табл. 1.

Анализ погрешности эфемерид по всему ансамблю 66 спутников астероидов позволяет сделать следующие выводы. Для 14 спутников эфемериды в 2023–2025 гг. оказываются недостоверными. Еще для 29 спутников погрешность эфемерид составляет от 0.1 до 0.5 от видимого размера большой полуоси орбиты. Только 23 спутника

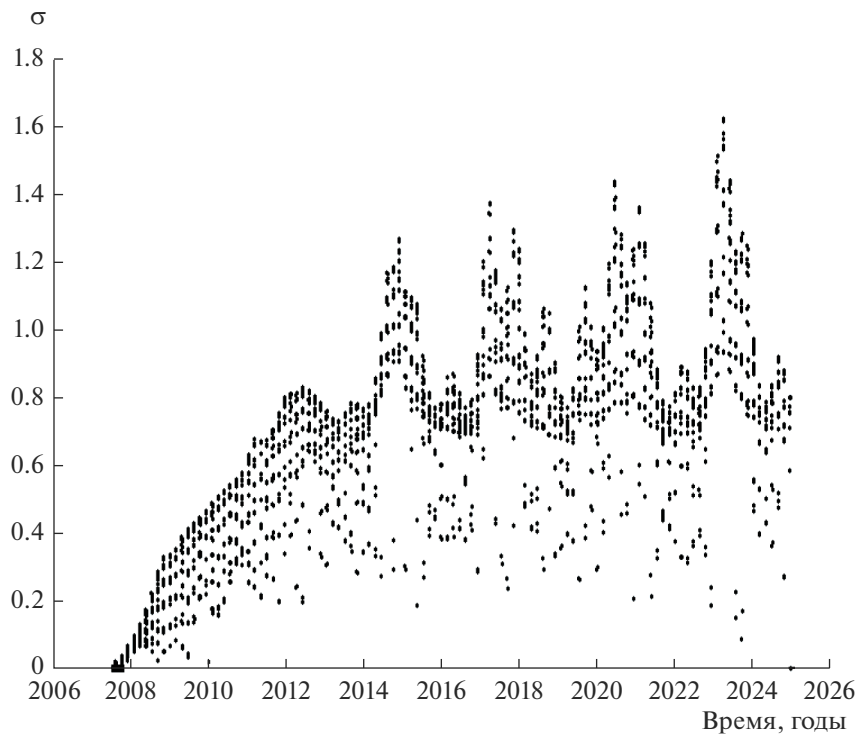


Рис. 2. Изменения во времени погрешности σ эфемериды спутника Pichi ūñēm астероида (702) Alauda. См. также комментарий в подписи к рис. 1.

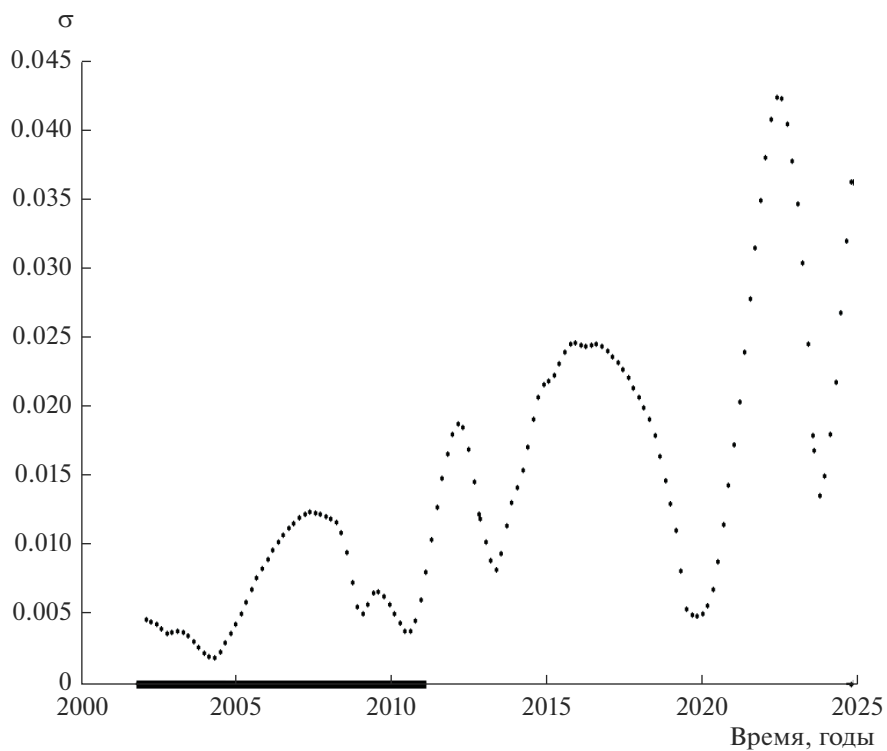


Рис. 3. Изменения во времени погрешности σ эфемериды спутника астероида 2000 CF105. См. также комментарий в подписи к рис. 1.

Таблица 2. Результаты определения параметров орбит новых спутников астероидов. Погрешности параметров ($\pm$) даны как значения 1σ ошибок, найденных по методу наименьших квадратов

Параметр	(31) Euphrosyne	(41) Daphne	(3548) Eurybates	(317) Roxane
Число наблюдений	5	30	9	43
Интервал времени наблюдений, лет	0.07	10.356	2.417	7.186
Эпоха, t_0 , MJD	58 564.8	54 550.1	58 373.0	55 159.0
n , угл. град/сут	297.70 ± 0.26	316.49843 ± 0.00023	4.263 ± 0.014	30.1407 ± 0.0012
e	0.047 ± 0.036	0.0080 ± 0.0033	0.117 ± 0.046	0.075 ± 0.012
i , угл. град	1.33 ± 0.31	128.2 ± 0.6	114.8 ± 9.6	161.1 ± 0.7
M_0 , угл. град	2.6 ± 9.6	346 ± 19	324 ± 17	95.96 ± 7.7
ω , угл. град	136 ± 19	186 ± 19	180 ± 15	314.3 ± 6.8
Ω , угл. град	77 ± 19	272.9 ± 0.6	325.3 ± 6.6	186.7 ± 2.0
a , км	673.7 ± 4.7	461.3 ± 1.9	2945 ± 318	245.3 ± 3.0
Период, сут	1.209	1.137	84.442	11.9440
Gm , км ³ /с ²	1.106 ± 0.025	0.401 ± 0.005	0.019 ± 0.006	0.00055 ± 0.00002

имеют достоверные эфемериды с ошибками, не превышающими 0.1 от видимого размера большой полуоси орбиты. Для 10 из них эфемериды оказываются достаточно точными с ошибками не больше 0.02 от видимого размера большой полуоси.

Кроме того, справедлива следующая закономерность: погрешность эфемерид пропорциональна погрешности наблюдений и обратно пропорциональна интервалу времени наблюдений, на которых основано определение орбиты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ СПУТНИКОВ АСТЕРОИДОВ, ОТКРЫТЫХ В ПОСЛЕДНЕЕ ВРЕМЯ

Со времени публикации нашей работы (Emelianov, Drozdov, 2020), когда мы определили орбиты 62 спутников, появились сообщения о новых наблюдениях спутников астероидов. Мы приняли определение орбит новых четырех спутников.

Сначала мы помещаем новые наблюдения из публикаций в нашу базу данных. Затем берем новые наблюдения из этой базы данных, чтобы определять параметры орбит. Метод определения орбит описан в наших предшествующих работах. Здесь приведем результаты.

Мы называем одним наблюдением измеренные разности двух небесных координат спутника и астероида. Измерение координат выполняется в некоторый момент наблюдения t .

Орбитальными параметрами мы называем элементы кеплеровой орбиты: n — среднее движение, e — эксцентриситет, i — наклон, M — средняя аномалия в эпоху, ω — угловое расстояние пери-

центра от восходящего узла, Ω — долгота восходящего узла, a — большая полуось. Мы задаем некоторую эпоху t_0 для отсчета средней аномалии. Измеряемая величина X — это разность прямых восхождений спутника и астероида, умноженная на косинус склонения астероида, Y — разность склонений. Эти величины отсчитываются в геоэкуаториальной системе координат некоторой эпохи экватора и равноденствия. Определение элементов производится так, что получаемые элементы i , ω , Ω отсчитываются в той же системе координат. Заметим, что мы определяем параметры n и a из наблюдений независимо. Это позволяет найти потом суммарную массу системы m из известного соотношения

$$Gm = n^2 a^3,$$

где G — гравитационная постоянная.

В публикациях (Green, 2019; Yang и др., 2020) приведены данные 2 и 5 наблюдений, соответственно, спутника астероида (31) Euphrosyne. Наблюдения включены в нашу базу данных в порциях abin0158 и abin0159. Наблюдения в порции abin0159 повторяют два из наблюдений в порции abin0158. Фактически, мы имеем пять наблюдений. Эти пять наблюдений позволили нам определить орбиту спутника. Фактически, мы составили 10 условных уравнений для определения семи параметров. Такое малое число условных уравнений заведомо должно привести к низкой точности определяемых параметров. Правомочность такого решения находится под сомнением. Мы получили формальное решение методом наименьших квадратов. Полученные результаты помещены в табл. 2.

В публикации (Carry и др., 2019) даны 30 наблюдений спутника Peneius астероида (41) Daphne.

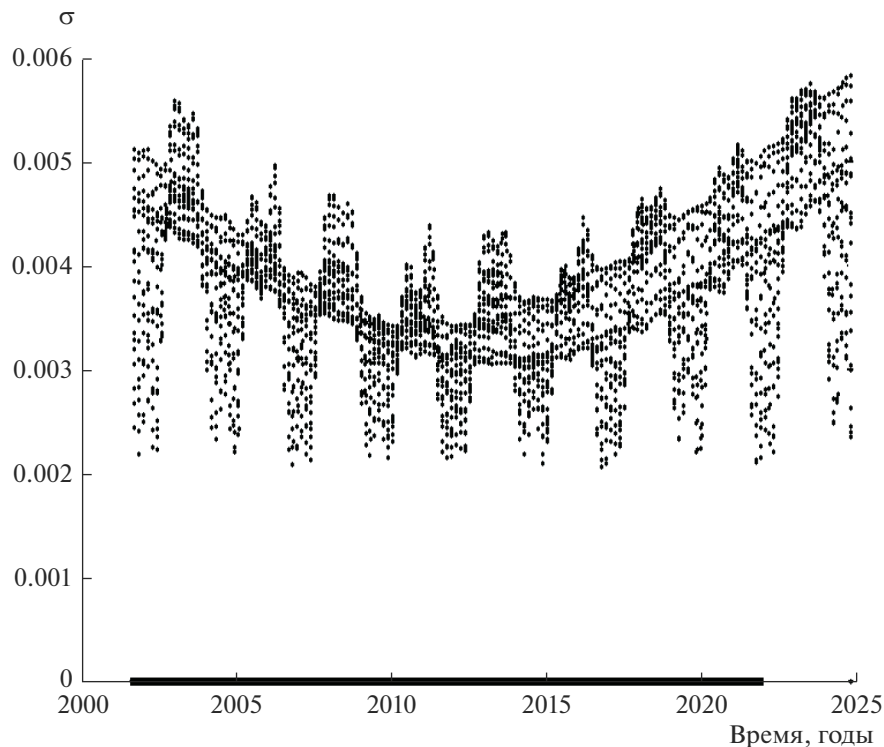


Рис. 4. Изменения во времени погрешности σ эфемериды спутника Linus астероида (22) Kalliope. См. также комментарий в подписи к рис. 1.

В нашей базе данных эти наблюдения содержатся в порции abin0160. Мы определили параметры орбиты этого спутника. Результаты приведены в табл. 2.

В публикации (Brown и др., 2021) приведены данные девяти наблюдений спутника Queta астероида (3548) Eurybates. В нашей базе данных эти наблюдения содержатся в порции abin0163. Мы нашли формальное решение для параметров орбиты этого спутника. Результаты приведены в табл. 2.

В публикации (Drummond и др., 2021) мы нашли данные 43 наблюдений спутника Oympias астероида (317) Roxane. В нашей базе данных эти наблюдения содержатся в порции abin0164. Мы определили параметры орбиты этого спутника. Результаты приведены в табл. 2.

Определение орбит этих четырех спутников было сделано также в работах, из которых мы взяли данные наблюдений. Сравнение наших результатов с результатами этих работ показывает, что различия в полученных параметрах орбит не превышают уровень оценок точности 3σ от оценок точности параметров. Отметим, что оценки точности параметров не отражают реальную точность эфемерид. Необходимо делать оценки точности эфемерид с использованием ковариационной матрицы ошибок параметров.

Низкая точность эфемерид спутника астероида (31) Euphrosyne, обусловленная малым составом наблюдений, показана графиком на рис. 5. Видно, что к настоящему времени эфемериды уже непригодны для использования, поскольку ошибки вычисляемых положений имеют величину, сравнимую с размерами орбиты.

ОБНОВЛЕНИЕ ЭФЕМЕРИД НЕКОТОРЫХ СПУТНИКОВ АСТЕРОИДОВ НА ОСНОВЕ НОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Кроме определения орбит новых спутников астероидов, были обновлены параметры орбит некоторых спутников, которые были ранее включены в сервер эфемерид. Обновление параметров делалось на основе нового состава наблюдений, расширенного путем добавления новых наблюдений.

Были обновлены эфемериды спутника Menoptius астероида (617) Patroclus. Наблюдения добавлены из порции abin0161 нашей базы данных. Туда результаты наблюдений попали из публикаций (Roth и др., 2001; Marchis и др., 2006). По сравнению с работой (Emelyanov, Drozdov, 2020) число наблюдений увеличилось с 9 до 21.

Были обновлены эфемериды спутника Linus астероида (22) Kalliope. Добавляемые результаты наблюдений были взяты из двух разных источни-

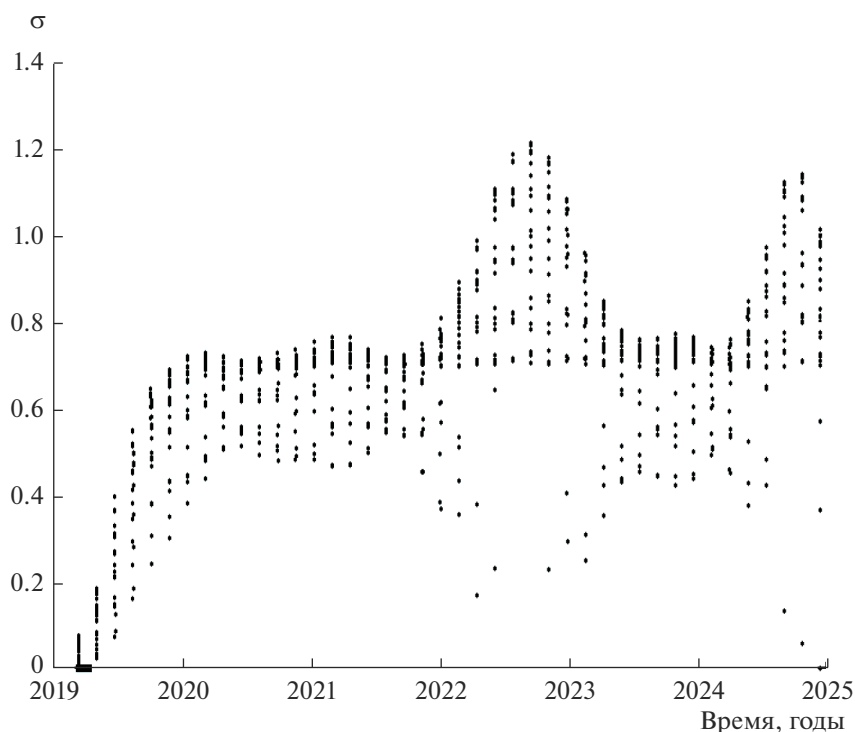


Рис. 5. Изменения во времени погрешности σ эфемериды спутника астероида (31) Euphrosyne. См. также комментарий в подписи к рис. 1.

ков. Первый — порция abin0134, из нашей базы данных. Эта порция наблюдений опубликована в работе (Vachier и др., 2012).

Вторая порция добавлена в результате наблюдений, выполненных на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН с применением спекл-интерферометра на основе сверхчувствительного EMCCD детектора. В ходе этих наблюдений были проведены 27 спекл-интерферометрических серий изображений, каждая из которых состоит из 2000–6000 кадров, полученных с экспозицией от 20 до 100 мс в полосе спектра, соответствующей максимуму чувствительности детектора. Эти наблюдения астероида (22) Kalliope и его спутника проводились в интервале времени более 5 лет: с 18 сентября 2016 г. по 4 декабря 2017 г. (24 измерения) и 16 декабря 2021 г. (3 измерения). Результаты приведены в табл. 3.

После добавления новых наблюдений их число увеличилось со 115 до 154, а интервал времени наблюдений увеличился с 16.74 до 20.29 лет.

ДВА КРАЙНИХ ПРИМЕРА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ЭФЕМЕРИД СПУТНИКОВ АСТЕРОИДОВ

Рассмотрим здесь еще два примера орбит спутников астероидов. Один пример наилучшей точ-

ности эфемерид и один пример наихудшей точности эфемерид.

После добавления результатов наблюдений для спутника Linus астероида (22) Kalliope интервал времени наблюдений увеличился. Можно ожидать хорошей точности эфемерид.

Оценки точности для этого случая демонстрируются графиком на рис. 4.

На графике видно, что точность эфемеридных положений спутника Linus относительно самого астероида составляет 0.006 от размера орбиты. Это можно считать наиболее благоприятным случаем определения орбиты и эфемерид.

Теперь рассмотрим оценки точности для самого неблагоприятного случая, когда всего пять наблюдений выполнены на весьма коротком интервале времени 25.4 суток. Распределение погрешности эфемериды во времени для этого случая показано на рис. 5.

На рис. 5 видно, что уже через два года после последнего наблюдения спутника астероида (31) Euphrosyne точность эфемерид деградировала настолько, что ошибка относительного положения спутника имеет примерно величину размера орбиты. Такие эфемериды нельзя считать достоверными.

Отметим некоторое свойство оценок точности эфемерид, приведенных на графиках.

Таблица 3. Результаты наблюдений спутника Linus астероида (22) Kalliope, выполненных на БТА САО РАН в 2016–2021 годах. В колонке ρ указано угловое разделение между астероидом и спутником, в колонке Θ — позиционный угол, $\sigma\rho$ и $\sigma\Theta$ — соответствующие погрешности измерений

Момент, JD	ρ , мс дуги	$\sigma\rho$, мс дуги	Θ , угл. град	$\sigma\Theta$, угл. град
2457649.497917	517.0	3.0	186.5	0.9
2457649.505556	492.0	1.0	187.2	0.3
2457649.556944	468.0	4.0	188.2	1.0
2457649.561806	464.0	4.0	187.9	0.5
2457711.622917	575.0	1.0	0.0	0.3
2457712.285417	750.0	1.0	4.3	0.1
2457712.492361	593.0	1.0	5.6	0.1
2457712.615972	491.0	2.0	7.0	0.2
2457713.361111	509.0	6.0	179.9	0.5
2457713.618056	734.0	2.0	182.5	0.1
2457714.340278	548.0	7.0	187.1	0.3
2457714.409028	480.0	3.0	187.7	0.6
2457714.498611	367.0	10.0	190.2	0.2
2457793.242361	645.0	7.0	182.1	0.3
2457793.328472	575.0	2.0	186.8	0.9
2457793.413889	512.0	6.0	190.7	0.2
2457793.491667	460.0	8.0	195.0	0.5
2458089.600694	445.0	6.0	32.5	0.5
2458089.637500	448.0	2.0	29.4	0.5
2458090.547222	449.0	5.0	297.1	0.5
2458090.606250	456.0	3.0	290.5	0.5
2458090.648611	455.0	2.0	286.8	0.2
2458091.540972	449.0	6.0	199.8	0.3
2458091.579167	446.0	3.0	195.0	0.4
2459564.24899	619.0	9.0	7.5	0.7
2459564.31837	542.8	7.0	8.95	0.4
2459564.43233	407.9	4.0	11.8	0.5

Для каждого момента времени на графиках виден разброс значений. Это означает, что на одном периоде обращения спутника погрешность эфемериды значительно изменяется. Дело в том, что мы имеем проекцию орбиты на картинную плоскость. Эта плоскость перпендикулярна лучу зрения и проходит через главную компоненту системы астероид-спутник. Вектор относительной скорости спутника может лежать в картинной плоскости, тогда ошибка вдоль орбиты составляет ошибку в небесных координатах. Вектор относительной скорости спутника может располагаться перпендикулярно картинной плоскости. В этом случае ошибка вдоль пространственной орбиты спутника не видна на картинной плоскости. В процессе движения по орбите спутник может проходить столь разные места, что и приводит к разным оценкам эфемерид в небесных координатах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем кратко результаты работы.

В последнее время были открыты новые спутники астероидов и опубликованы новые наблюдения уже известных спутников. В результате настоящей работы определены орбиты четырех новых спутников астероидов и обновлены эфемериды ранее известных спутников. Найденные параметры орбит даны здесь в статье. Все новые построения эфемерид спутников астероидов отражаются в созданном сервере эфемерид, позволяющем получать эфемериды путем обращения на страницы сервера в интернете.

Построение эфемерид спутников астероидов сопровождается получением оценок точности. Мы делаем такие оценки и помещаем их в доступ в нашем сервере. В настоящей работе мы объяс-

нили, как это делается, и привели несколько примеров. Показано, что точность эфемерид существенно зависит от интервала времени наблюдений: чем больше интервал, тем точнее эфемериды.

Из оценок точности следует важный результат: для некоторого числа спутников точность эфемерид деградировала к настоящему времени настолько, что эфемериды стали практически непригодными. Имеется острая необходимость новых наблюдений спутников астероидов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (Россия) и НЦНИ (Франция) в рамках научного проекта № 19-52-150015-НЦНИ_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баньщикова М.А., Авдюшев В.А., Шмидт Е.Е. Нелинейность в обратных задачах динамики внешних спутников Юпитера // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 5. С. 485–490.
(*Banshchikova M.A., Avdyushev V.A., Shmidt E.E.* Non-linearity in Inverse Problems of the Dynamics of Jupiter's Outer Satellites // *Sol. Syst. Res.* 2021. V. 55. Iss. 5. P. 475–480).
- Емельянов Н.В., Вашковьяк С.Н., Уральская В.С. Источники и базы данных для изучения динамики спутников астероидов // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 3. С. 260–266. (*Emel'yanov N.V., Vashkov'yak S.N., Ural'skaya V.S.* Sources and Databases for the Study of the Dynamics of Moons of Asteroids // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. Iss. 3. P. 260–265).
- Avdyushev V. Nonlinear methods of statistic simulation of virtual parameter values for investigating uncertainties in orbits determined from observations // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2011. V. 110. № 4. P. 369–388.
- Brown M.E., Levison H.F., Noll K.S., Binzel R., Buie M.W., Grundy W., Marchi S., Olkin C.B., Spencer J., Statler T.S., Weaver H. The orbit and density of the Jupiter Trojan satellite system Eurybates-Queta // *Planet. Sci. J.* 2021. V. 2. Iss. 5. id.170. (6 p.)
- Carry B., Vachier F., Berthier J., Marsset M., Vernazza P., Grice J., Merline W.J., Lagadec E., Fienga A., Conrad A., Podlowska-Gaca E., Santana-Ros T., Viikinkoski M., Hanuš J., Dumas C., Drummond J.D., Tamblyn P.M., Chapman C.R., Behrend R., Bernasconi L. Homogeneous internal structure of CM-like asteroid (41) Daphne // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 623. id. A132. (36 p.).
- Drummond J.D., Merline W.J., Carry B., Conrad A., Tamblyn P., Enke B., Christou J., Dumas C., Chapman C.R., Durda D.D., Owen W.M., Grundy W.M., Reynolds O.R., Buckman M.D. The orbit of asteroid (317) Roxane's satellite Olympias from Gemini, Keck, VLT and the SOR, and (22) Kalliope's Linus from the SOR // *Icarus.* 2021. V. 358. id. 114275.
- Emelyanov N. Precision of the ephemerides of outer planetary satellites // *Planet. and Space Sci.* 2010. V. 58. P. 411–420.
- Emelyanov N.V., Drozdov A.E. Determination of the orbits of 62 moons of asteroids based on astrometric observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2020. V. 494. P. 2410–2416.
- Emelyanov N.V., Drozdov A.E. Asteroid satellite ephemeride service. Mutual occultations and eclipses // *Icarus.* 2021. V. 355. id. 114160.
- Green D.W.E. New satellite around (31) Euphrosyne. Central Bureau for Astronomical Telegrams. 2019. N. 4627.
- Marchis F., Hestroffer D., Descamps P., Berthier J., Bouché A.H., Campbell R.D., Chin J.C. Y., van Dam M.A., Hartman S.K., Johansson E.M., Lafon R.E., Le Mignant D., de Pater I., Stomski P.J., Summers D.M., Vachier F., Wizinovich P.L., Wong M.H. A low density of 0.8 g cm^{-3} for the Trojan binary asteroid 617 Patroclus // *Nature.* 2006. V. 439. Iss. 7076. P. 565–567.
- Roth K.C., Guyon O., Chun M., Jensen J.B., Jorgensen I., Rigaut F., Walther D.M. Hokupa'a performance and point spread function characterization // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2001. V. 33. P. 785.
- Vachier F., Berthier J., Marchis F. Determination of binary asteroid orbits with a genetic-based algorithm // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 543. id. A68. (9 p.).
- Yang B., Hanuš J., Carry B., Vernazza P., Brož M., Vachier F., Rambaux N., Marsset M., Chrenko O., Ševeček P., Viikinkoski M., Jehin E., Ferrais M., Podlowska-Gaca E., Drouard A., Marchis F., Birlan M., Benkhaldoun Z., Berthier J., Bartczak P. Binary asteroid (31) Euphrosyne: ice-rich and nearly spherical // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 641. id. A80. (9 p.).