

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ



**VI Международная молодежная научная конференция
«Актуальные проблемы современной механики
сплошных сред и небесной механики»**

16–18 ноября 2016 г., Томск



Издательство Томского университета
2017

ДОКЛАДЫ

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ПЛАНЕТНЫХ ЭФЕМЕРИД *

А.П. Батурин, С.И. Королев

Представлен программный комплекс для улучшения орбит и численного прогнозирования движения астероидов с использованием при учете возмущений ряда эфемерид больших планет и Луны, а именно: DE405, DE408, DE414, DE422, DE423, DE424, DE425, DE430, DE431, DE432, DE433, DE434, DE435 и EPM2011. Выполнено сравнение результатов прогнозирования, полученных с использованием перечисленных эфемерид, для четырех астероидов, два из которых имеют короткую дугу наблюдаемости и два – длинную. Показано, что использование новых эфемерид дает более близкие друг к другу результаты прогнозирования, чем при использовании старых и новых эфемерид.

THE COMPLEX OF PROGRAMS FOR THE PREDICTING ASTEROID'S MOTION WITH DIFFERENT PLANETS' EPHEMERIDES

A.P. Baturin, S.I. Korolev

The program complex for the numerical simulation of the motion of asteroids is presented. It takes into account perturbations from all major planets and the Moon with commonly used ephemerides DE405, DE408, DE414, DE422, DE423, DE424, DE425, DE430, DE431, DE432, DE433, DE434, DE435 and EPM2011. The motion of four asteroids has been predicted. The comparison of the results obtained with all these ephemerides has been performed. It has been demonstrated that usage of new ephemerides gives closer results than usage of old and new ephemerides.

К настоящему времени выпущено большое число планетных эфемерид, используемых при учете возмущений в задаче прогнозирования движения астероидов, и потому в астрономической практике существует проблема выбора наиболее точных эфемерид. В настоящей работе рассмотрена задача прогнозирования движения астероидов с использованием при учете возмущений наиболее употребительных эфемерид больших планет и Луны, а именно: DE405, DE408, DE414, DE422, DE423, DE424, DE425, DE430, DE431, DE432, DE433, DE434, DE435 (<ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets>) и EPM2011 (<ftp://quasar.ipa.nw.ru/incoming/EPM>). При проведении исследования применяются разработанные ранее [1–3] программы улучшения орбит и прогнозирования движения астероидов. В обе программы была добавлена возможность использования выпущенных в последнее время эфемерид DE433, DE434 и DE435.

Главное окно программы улучшения орбиты приведено на рис. 1.

* Данное научное исследование (проект № 8.1.54.2015) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г.

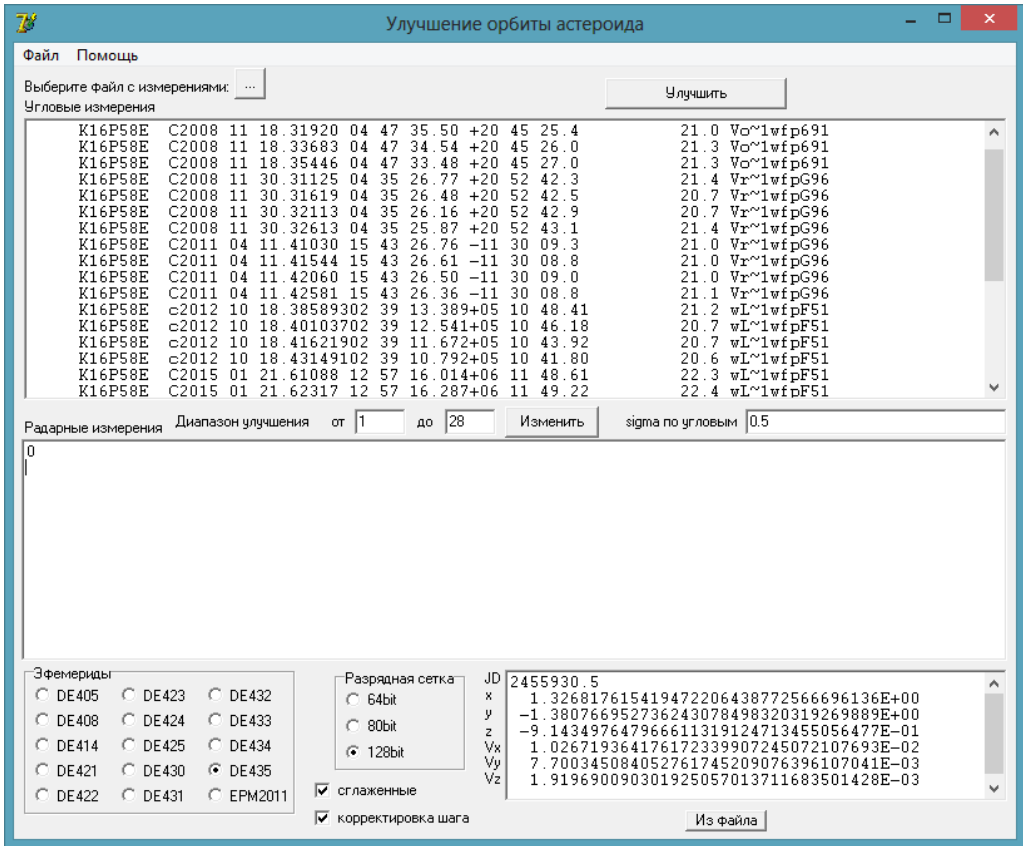


Рис. 1. Главное окно программы улучшения орбит астероидов

В верхней части окна вводятся астрометрические (угловые) наблюдения астероида в формате, принятом в Центре малых планет (<http://minorplanetcenter.net>); в средней части – радарные наблюдения (если они есть) в том же формате. В нижней части окна справа вводятся эпоха улучшаемых начальных параметров движения в виде юлианской даты и сами параметры в виде экваториальных гелиоцентрических координат и компонент скорости, отнесенных к стандартной эпохе 2000.0. Внизу окна интерфейса с левой стороны расположены переключатели используемых при учете возмущений эфемерид больших планет и Луны, а также переключатель разрядной сетки, т.е. размера чисел с плавающей точкой, используемых при выполнении вычислений. Кроме того, в программе предусмотрена возможность использования эфемерид, сглаженных [4] на границах эфемеридных интервалов интерполирования до первых производных от координат, а также корректировки шага интегрирования [4] в соответствии с этими границами.

Главное окно программы прогнозирования движения астероидов приведено на рис. 2.

Прогнозирование движения с различными эфемеридами

Начальная эпоха

	Начальные данные 1	Начальные данные 2
	<input checked="" type="radio"/> Координаты (эквадор 2000.0) <input type="radio"/> Элементы (эклиптика 2000.0)	<input checked="" type="radio"/> Координаты (эквадор 2000.0) <input type="radio"/> Элементы (эклиптика 2000.0)
X (a)	1.326817627111463407646041857757021E+00	1.326817615419472206438772650337013E+00
Y (e)	-1.380766943889033755128538695845871E+00	-1.380766952736243078498319600484076E+00
Z (i)	-9.143497559665990154337370757537623E-01	-9.143497647966611319124725350589274E-01
X' (Omega)	1.026719361100301733497293025997662E-02	1.026719364176172339907244925384586E-02
Y' (omega)	7.700345140534486239646563791535520E-03	7.700345084052761745209077201156898E-03
Z' (M)	1.919690095678160283563416955215107E-03	1.919690090301925057013712351171276E-03

Интервал прогнозирования, сут. Порядок: Начальный шаг, сут.:

Интервал выдачи, сут.:

Выбор первой эфемериды	Выбор второй эфемериды
<input checked="" type="radio"/> DE 405 (2305424.5-2524624.5)	<input type="radio"/> DE 405 (2305424.5-2524624.5)
<input type="radio"/> DE 408 (-1938159.5-5376912.5)	<input type="radio"/> DE 408 (-1938159.5-5376912.5)
<input type="radio"/> DE 414 (2305424.5-2524624.5)	<input type="radio"/> DE 414 (2305424.5-2524624.5)
<input type="radio"/> DE 421 (2414992.5-2469808.5)	<input type="radio"/> DE 421 (2414992.5-2469808.5)
<input type="radio"/> DE 422 (625648.5-2816816.5)	<input type="radio"/> DE 422 (625648.5-2816816.5)
<input type="radio"/> DE 423 (2378480.5-2524624.5)	<input type="radio"/> DE 423 (2378480.5-2524624.5)
<input type="radio"/> DE 424 (625296.5-2780272.5)	<input type="radio"/> DE 424 (625296.5-2780272.5)
<input type="radio"/> DE 425 (2305424.5-2524624.5) <input checked="" type="checkbox"/> сгл.	<input type="radio"/> DE 425 (2305424.5-2524624.5) <input checked="" type="checkbox"/> сгл.
<input type="radio"/> DE 430 (2287184.5-2688976.5)	<input type="radio"/> DE 430 (2287184.5-2688976.5)
<input type="radio"/> DE 431 (-3100015.5-7999984.5)	<input type="radio"/> DE 431 (-3100015.5-7999984.5)
<input type="radio"/> DE 432 (2287184.5-2688976.5)	<input type="radio"/> DE 432 (2287184.5-2688976.5)
<input type="radio"/> DE 433 (2287184.5-2688976.5)	<input type="radio"/> DE 433 (2287184.5-2688976.5)
<input type="radio"/> DE 434 (2287184.5-2688976.5)	<input type="radio"/> DE 434 (2287184.5-2688976.5)
<input type="radio"/> DE 435 (2287184.5-2688976.5)	<input checked="" type="radio"/> DE 435 (2287184.5-2688976.5)
<input type="radio"/> EPM2011 (2374000.5-253000.5)	<input type="radio"/> EPM2011 (2374000.5-253000.5)

Корректировка шага Корректировка шага

Расчет сближений с планетами (рядом указывается максимальное расстояние в а.е.)

<input type="checkbox"/> Меркурий <input type="text" value="0.1"/>	<input type="checkbox"/> Марс <input type="text" value="0.1"/>	<input type="checkbox"/> Уран <input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/> Венера <input type="text" value="0.1"/>	<input type="checkbox"/> Юпитер <input type="text" value="0.1"/>	<input type="checkbox"/> Нептун <input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/> Земля <input type="text" value="0.1"/>	<input type="checkbox"/> Сатурн <input type="text" value="0.1"/>	<input type="checkbox"/> Плутон <input type="text" value="0.1"/>

Разрядная сетка, бит: 64 (16 десятичных знаков) 80 (19 десятичных знаков) 128 (34 десятичных знака)

Разрядность ОС, бит: 32 64

Рис. 2. Главное окно программы прогнозирования движения астероидов

Данная программа предназначена для одновременного прогнозирования движения двух траекторий с различными или одинаковыми начальными параметрами с использованием при учете возмущений для каждой из траекторий различных эфемерид. Основное окно программы приведено на рис. 2. В верхней строке окна задается начальная эпоха параметров движения, которые вводятся в расположенных ниже окнах и могут быть заданы как в виде прямоугольных координат и компонент скорости, отнесенных к экватору и равноденствию 2000.0, так и в виде оскулирующих элементов орбиты, отнесенных к эклиптике и равноденствию 2000.0. Кнопка «Копировать» позволяет скопировать содержимое левого окна в правое, однако для корректного использования каких-либо эфемерид необходимо, чтобы начальные параметры были предварительно улучшены с теми же эфемеридами, с которыми будет выполняться прогнозирование.

Далее задаются интервал прогнозирования, шаг выдачи координат в сутках, а также параметры подпрограммы численного интегрирования методом Эверхарта [5, 6]: порядок метода 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31, 35, 39; параметр LL, определяющий до-

пустимую локальную погрешность 10^{-LL} при выборе переменного шага (задание отрицательного значения LL устанавливает постоянный шаг интегрирования, равный начальному) и начальный шаг интегрирования.

Ниже расположены панели выбора эфемерид для первой и второй траекторий (в скобках для каждой эфемериды указан охватываемый ею интервал времени в виде пары юлианских дат), а также переключатели «сгл.», позволяющие вместо исходных эфемерид использовать их сглаженные [4] (до первых производных) варианты. Далее для каждой траектории расположены переключатели, позволяющие использовать корректировку шага интегрирования в соответствии с границами эфемеридных интервалов интерполирования. Как показано в работах [1, 4], использование сглаженных эфемерид позволяет повысить точность численного интегрирования при расчетах на расширенной разрядной сетке (80 или 128 бит), так как в сглаженных вариантах эфемерид устранены скачки координат и их первых производных на границах эфемеридных интервалов интерполирования. Использование корректировки шага также повышает [1, 4] точность численного интегрирования, поскольку устраняет влияние скачков производных высшего порядка от координат возмущающих тел, имеющих место на указанных границах.

Внизу формы находятся: переключатель разрядной сетки, задающий размер чисел с плавающей точкой (64, 80 или 128 бит), используемых при выполнении вычислений; переключатель разрядности операционной системы (32 или 64 бита), предусмотренный для возможности использования в 64-разрядной операционной системе 64-разрядного исполняемого кода, который работает значительно быстрее 32-разрядного в случае 128-битовой разрядной сетки; кнопка «Пуск», запускающая процесс прогнозирования, и кнопка «График», открывающая окно с графиком вычисленных модулей разности векторов положения и скорости.

С помощью описанных программ были выполнены ряд улучшений орбиты и прогнозирование движения четырех астероидов: 2016 PE58 (№480800), 2016 PN57 (№480799), 2016 PL66 и 2016 PZ65. Первые два объекта имеют большой интервал наблюдаемости: около 8 и 11 лет соответственно, другие два – малый: 10 и 37 сут соответственно. Большие полуоси их орбит лежат в пределах от 1.4 до 2.7 а.е., эксцентриситеты – от 0.15 до 0.21 и наклоны – от 7.8^0 до 19.4^0 . Первый астероид имеет 28 наблюдений, второй – 78, третий – 15 и четвертый – 18. Наблюдения астероидов были взяты с сайта <http://minorplanetcenter.net>, дата обращения: ноябрь 2016 г.

Для каждого объекта выполнялись улучшение орбиты с использованием при учете возмущений всех упомянутых выше эфемерид и последующее прогнозирование движения с теми же эфемеридами на интервал времени 66920 сут (около 183 лет). Конечная дата прогнозирования задавалась вблизи 2200 г. – конечной даты самых коротких из используемых эфемерид (DE405, DE414, DE423 и DE425). Все расчеты выполнялись на 128-битовой разрядной сетке, т.е. с четверной машинной точностью, соответствующей 34-значной десятичной разрядности. Для численного интегрирования уравнений движения в описанных программах используется метод Эверхарта [5, 6] 27-го порядка с переменным шагом интегрирования (параметр LL задавался равным 18). При таких значениях порядка интегрирования и параметра LL, а также использовании сглаженных эфемерид совместно с корректировкой шага интегрирования точность численного интегрирования в координатах составляет менее 10^{-20} а.е. [4]. Выдача координат производилась путем выхода из интегратора через каждые 40 сут.

Далее выполнялось сравнение результатов прогнозирования путем вычисления модуля разности Δr в векторе положения на все моменты выдачи координат для каждой пары используемых эфемерид. На рис. 3–10 приведены графики Δr для случаев, когда одними из эфемерид в паре являются DE405 (рис. 3, 5, 7, 9) и DE435 (рис. 4, 6, 8, 10).

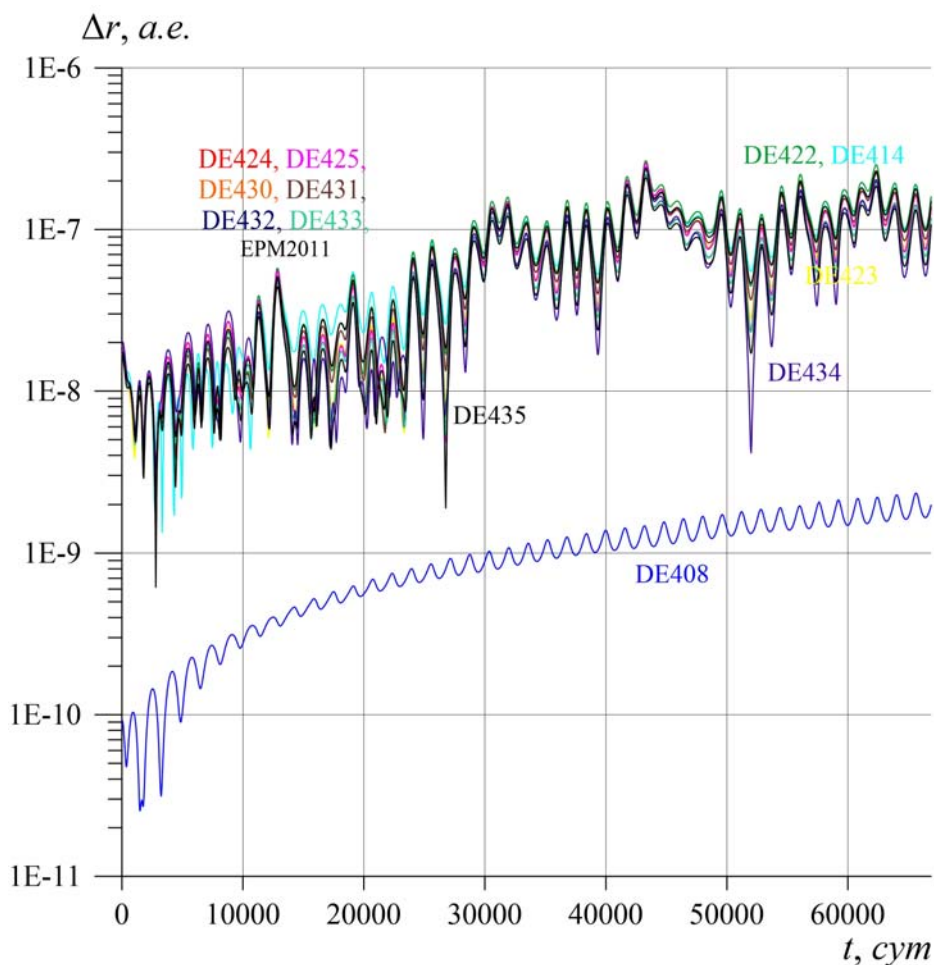


Рис. 3. Астероид 2016 PE58: эфемериды DE405 и остальные эфемериды

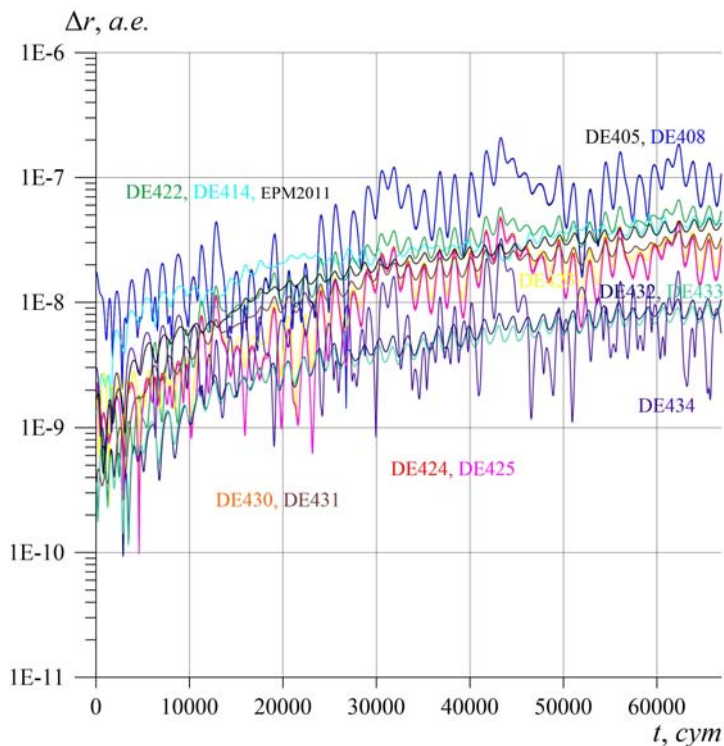


Рис. 4. Астероид 2016 PE58: эфемериды DE435 и остальные эфемериды

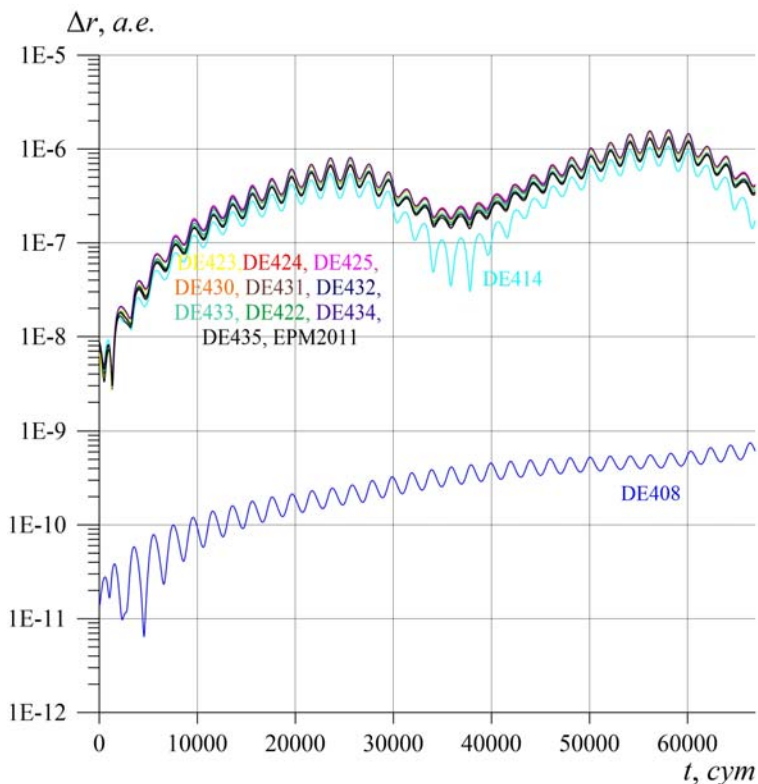


Рис. 5. Астероид 2016 PN57: эфемериды DE405 и остальные эфемериды

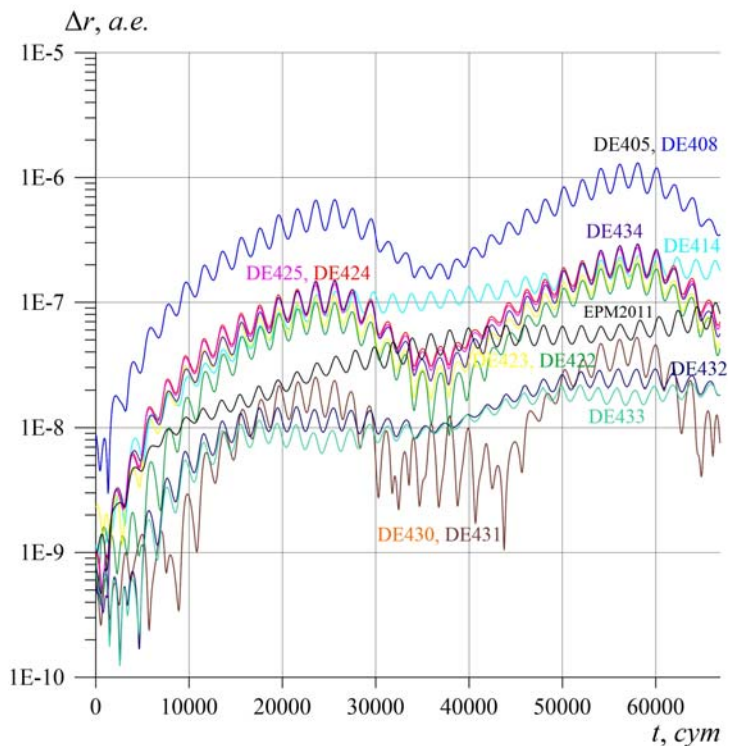


Рис. 6. Астероид 2016 PN57: эфемериды DE435 и остальные эфемериды

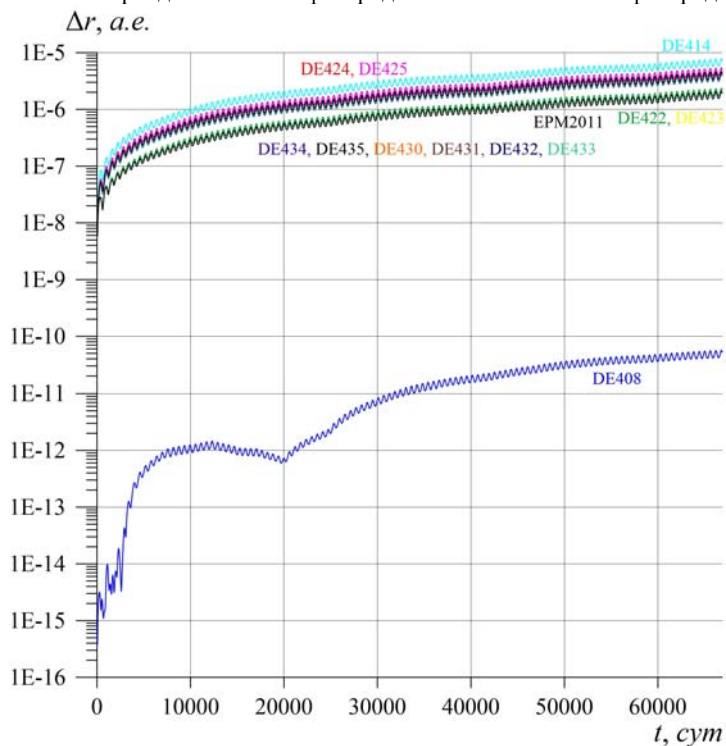


Рис. 7. Астероид 2016 PL66: эфемериды DE405 и остальные эфемериды

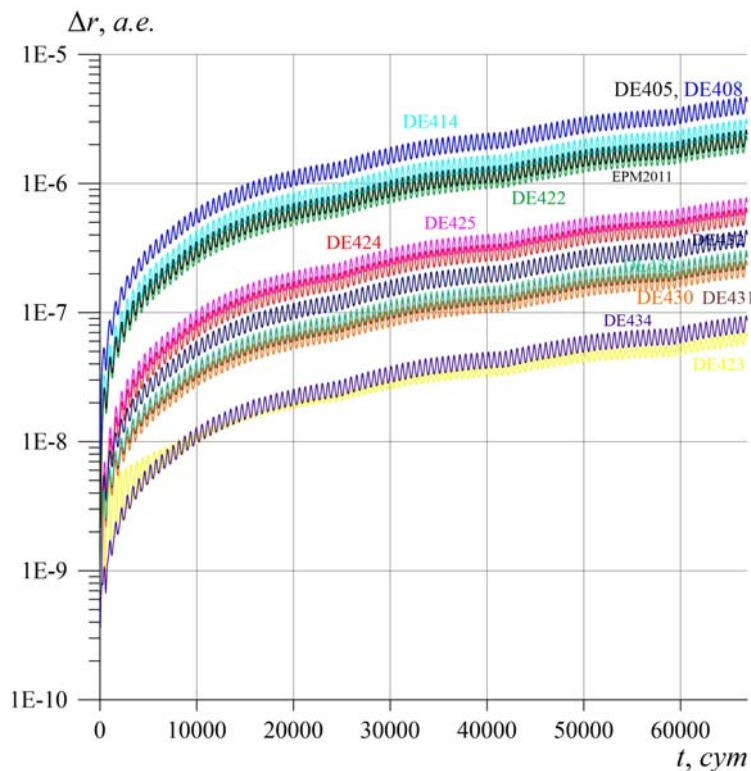


Рис. 8. Астероид 2016 PL66: эфемериды DE435 и остальные эфемериды Δr , а.е.

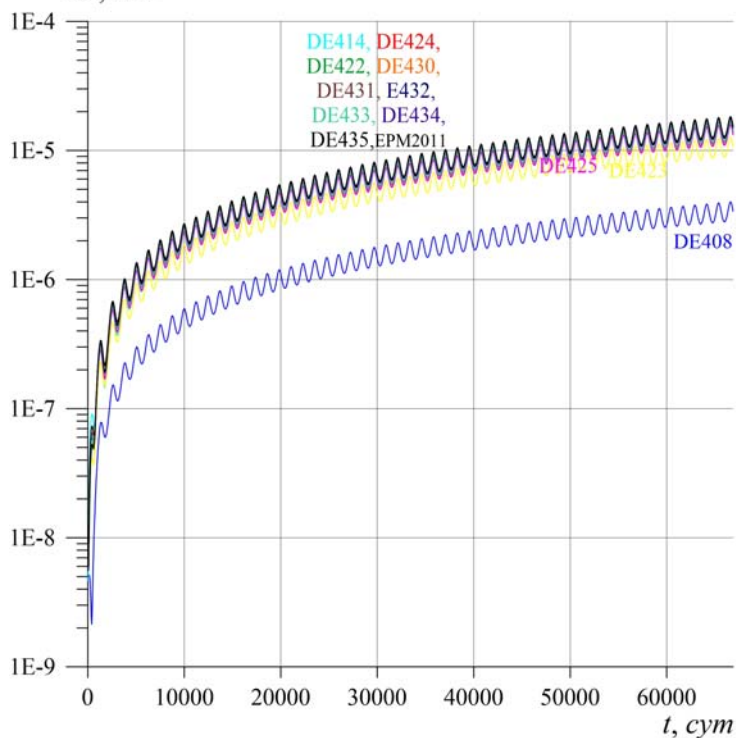


Рис. 9. Астероид 2016 PZ65: эфемериды DE405 и остальные эфемериды

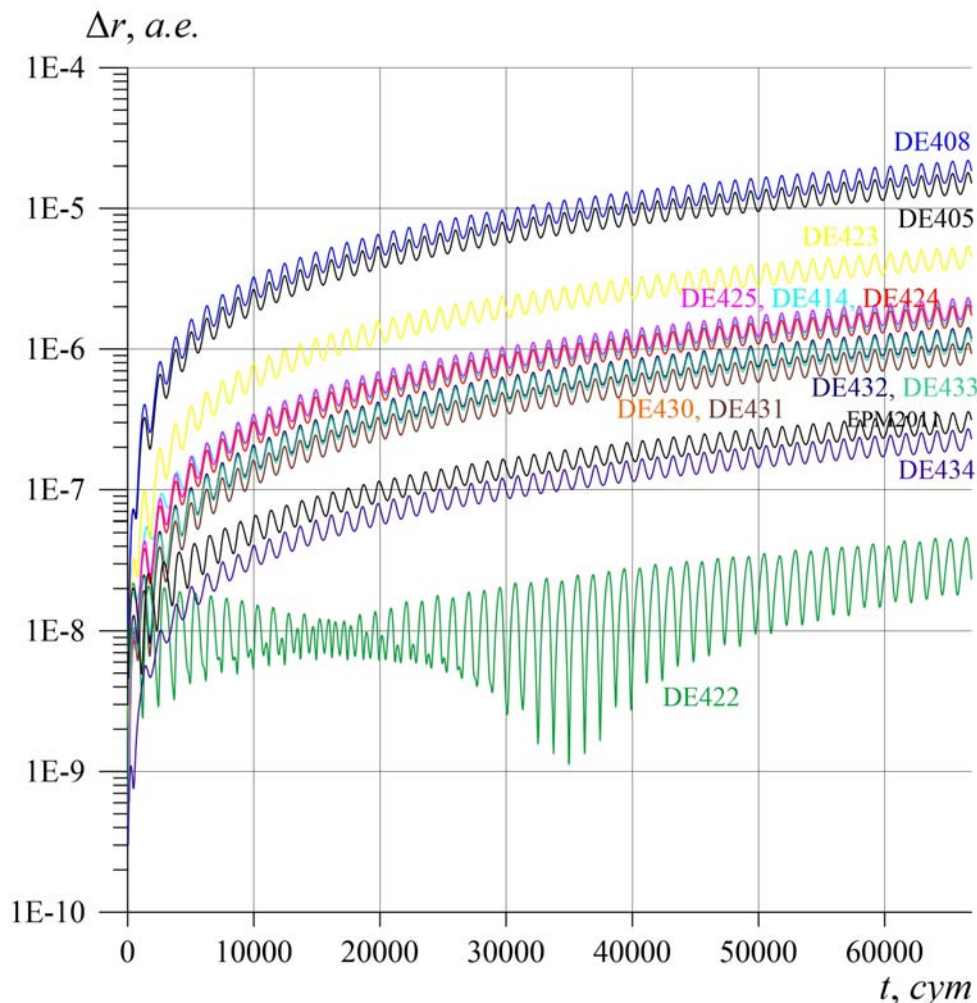


Рис. 10. Астероид 2016 PZ65: эфемериды DE435 и остальные эфемериды

Как видно из рис. 3–10, наибольшие отличия в прогнозируемом движении проявляются при использовании эфемерид DE405 (DE408) и всех остальных эфемерид. Эфемериды DE405 и DE408 – наиболее старые из всех рассматриваемых в работе. Заметим, что фактически это одни и те же эфемериды, различающиеся только охватываемым интервалом времени и величиной основного интервала интерполирования (32 и 64 сут соответственно). Поэтому кривые, соответствующие DE405 и DE408, везде практически совпадают.

Кроме того, из рисунков, соответствующих эфемеридам DE435 (см. рис. 4, 6, 8, 10), видно, что использование последних выпущенных эфемерид, таких как DE430–DE435, дает более близкие друг к другу результаты, чем использование более старых эфемерид, таких как DE405 (DE408). Поскольку можно предположить, что более новые эфемериды являются более точными, то при моделировании движения астероидов предпочтительнее применять наиболее современные эфемериды больших планет и Луны.

Литература

1. Батурин А.П., Вотчель И.А. Прогнозирование движения астероидов с использованием при учете возмущений различных планетных эфемерид // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 10/2. С. 17–24.
2. Батурин А.П., Кинзерский В.В. Исследование точности решения задачи улучшения орбит астероидов по данным их радарных и угловых наблюдений // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 10/2. С. 67–75.
3. Батурин А.П., Кинзерский В.В. Расчет сближений астероидов с Землей с использованием эфемерид DE405, DE432 и EPM2011 // Матер. V Междунар. мол. конф. «Актуальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: ТГУ, 2015. С. 125–130.
4. Батурин А.П. Влияние способов построения эфемерид больших планет и Луны на точность прогнозирования движения астероидов // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 9. С. 72–79.
5. Everhart E. An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings // Dynamics of comets: their origin and evolution (Proc. of the 83rd IAU Colloq. Rome, 11–15 June 1984) / eds. A. Carusi, G.B. Valsecchi. Dordrecht: D.Reidel Publishing Co., 1985. P. 185–202.
6. Бордовицына Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984. 136 с.