

УДК 523.44+519.6

*Л.Е. БЫКОВА, Т.Ю. ГАЛУШИНА, А.П. БАТУРИН***ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ИДА» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ АСТЕРОИДОВ<sup>1</sup>**

Описывается программный комплекс «ИДА», предназначенный для исследования динамики и вероятностной орбитальной эволюции астероидов. Особенности комплекса являются его многофункциональность, высокая эффективность и удобный интерфейс.

*Ключевые слова:* программное обеспечение, астероиды, динамика, сближения, орбитальный резонанс.

**Введение**

Исследование динамики астероидов (особенно сближающихся с большими планетами) представляет собой сложную задачу по ряду причин. Во-первых, начальные данные астероидов определяются из наблюдений и поэтому известны неточно. В связи с этим возможно только вероятностное представление орбитальной эволюции. Во-вторых, при численном интегрировании уравнений движения астероидов во время сближений с большими планетами может происходить значительное падение точности. При исследовании движения большое значение имеет выбор модели сил, влияние которых учитывается. Все указанные и многие другие факторы необходимо учитывать при создании программного обеспечения для исследования движения астероидов.

Разработанное прикладное программное обеспечение состоит из ряда прикладных программ, которые позволяют решать следующие задачи:

- построение численной модели движения астероида с учетом заданных возмущающих факторов;
- улучшение орбиты астероида по данным позиционных наблюдений;
- построение начальной доверительной области линейными и нелинейными методами;
- исследование орбитальной эволюции начальной доверительной области;
- выявление сближений и столкновений исследуемого астероида с большими планетами, Луной и Плутоном;
- оценка вероятности столкновения астероида с большими планетами и Луной;
- выявление соизмеримостей средних движений астероида и больших планет;
- демонстрация движения астероида и планет на экране компьютера в различных системах координат.

**1. Алгоритмы, реализованные в программном комплексе**

Движение астероидов рассматривается в рамках возмущенной задачи двух тел в гелиоцентрической системе координат, отнесенной к эклиптике или экватору 2000.0. Набор возмущающих факторов определяется пользователем из следующих возможных: возмущения от больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Земли, светового давления и релятивистских эффектов от Солнца. Координаты больших планет, Плутона и Луны вычисляются на основе фундаментальных эфемерид DE405, DE406 или DE408 (в зависимости от интервала исследования и желания пользователя). Дифференциальные уравнения движения интегрируются численно методом Эверхарта [1], порядок метода и параметр точности выбираются пользователем.

Улучшение орбит астероидов производится методом наименьших квадратов по имеющимся наземным и космическим позиционным наблюдениям. Результатом процесса улучшения являются параметры номинальной орбиты и ковариационная матрица. В программном комплексе реализованы два метода построения начальной доверительной области – в виде эллипсоида на основе полученной ковариационной матрицы и бутстрэп-методом [2, 3]. В первом случае тестовые частицы генериру-

<sup>1</sup> Работа выполнена по заданию № 2.4024.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации.

ются на основе нормального закона распределения с помощью датчика случайных чисел. Далее в обоих случаях проводится исследование орбитальной эволюции каждой тестовой частицы.

Для выявления сближений тестовых частиц с большими планетами и Луной используется алгоритм, основанный на вычислении минимума функции квадрата расстояния, которая аппроксимируется многочленом Лагранжа третьей степени относительно времени [4]. Для выявления соизмеримостей средних движений астероида и больших планет используются критический аргумент  $\beta$ , определяющий долготу соединения астероида и планеты:

$$\beta = k_1\lambda_1 - k_2\lambda_2 - (k_1 - k_2)\omega_1 - (k_1 - k_2)\Omega_1, \quad (1)$$

и его производная по времени  $\alpha$  (называемая резонансной «щелью») [5]

$$\alpha \approx k_1n_1 - k_2n_2, \quad (2)$$

где  $n_1, n_2$  – средние движения;  $\lambda_1, \lambda_2$  – средние долготы астероида и большой планеты соответственно;  $\omega_1$  – аргумент перигея астероида;  $\Omega_1$  – долгота восходящего узла астероида;  $k_1, k_2$  – целые положительные числа. Для исследования хаотичности в программном комплексе используется параметр MEGNO [6].

## 2. Структура программного комплекса

В программный комплекс входят следующие подсистемы:

- подсистема «Ассоль» [7, 8], которая позволяет исследовать орбитальную эволюцию для номинальной орбиты и демонстрировать движение астероида и тестовых частиц на экране компьютера;
- подсистема «Наблюдения» [9], предназначенная для улучшения орбиты астероида по данным позиционных наблюдений и построения начальной доверительной области линейным методом;
- подсистема «Distribution», созданная для визуализации распределения наблюдений по орбите астероида;
- подсистема «Ансамбль частиц» [9], которая позволяет получить начальную доверительную область в виде ансамбля тестовых частиц;
- подсистема «Evolution» [10], созданная для исследования орбитальной эволюции ансамбля частиц;
- подсистема «Графики» [11], разработанная для автоматизации процесса построения графиков эволюции резонансных характеристик и характеристики хаотичности MEGNO [12].

Подсистемы «Ассоль», «Наблюдения» и «Distribution» разработаны в среде Delphi, подсистема «Evolution» написана на языке ФОРТРАН, подсистема «Графики» представляет собой макрос на языке VBA. Подсистема «Ансамбль частиц» создана в двух вариантах – в среде Delphi и на языке ФОРТРАН.

## 3. Подсистема «Ассоль»

Подсистема «Ассоль» реализует численную модель движения астероида. Особенностью данной подсистемы является удобный интерфейс и визуализация движения астероида и больших планет на экране компьютера. Главное окно подсистемы содержит 4 вкладки:

- «Астероид»,
- «Параметры движения»,
- «Исследование»,
- «Авторы».

На вкладке «Астероид» необходимо указать следующую информацию:

- путь к фонду координат больших планет DE405 или DE406;
- путь к каталогу Э. Боуэлла [13];
- имя астероида;
- начальный и конечный момент времени (юлианская или календарная дата).

Для принятия данных подсистемой необходимо нажать кнопку «Сохранить», при этом происходит проверка наличия файлов фонда и каталога, поиск объекта в каталоге и перевод календарной даты в юлианскую или обратно.

На вкладке «Параметры движения» (рис. 1) можно выбрать:

- систему координат;
- масштаб изображения;

- скорость воспроизведения;
- объекты, движение которых будет показываться, вид и масштаб значков их обозначения;
- границы координатной сетки;
- язык интерфейса.

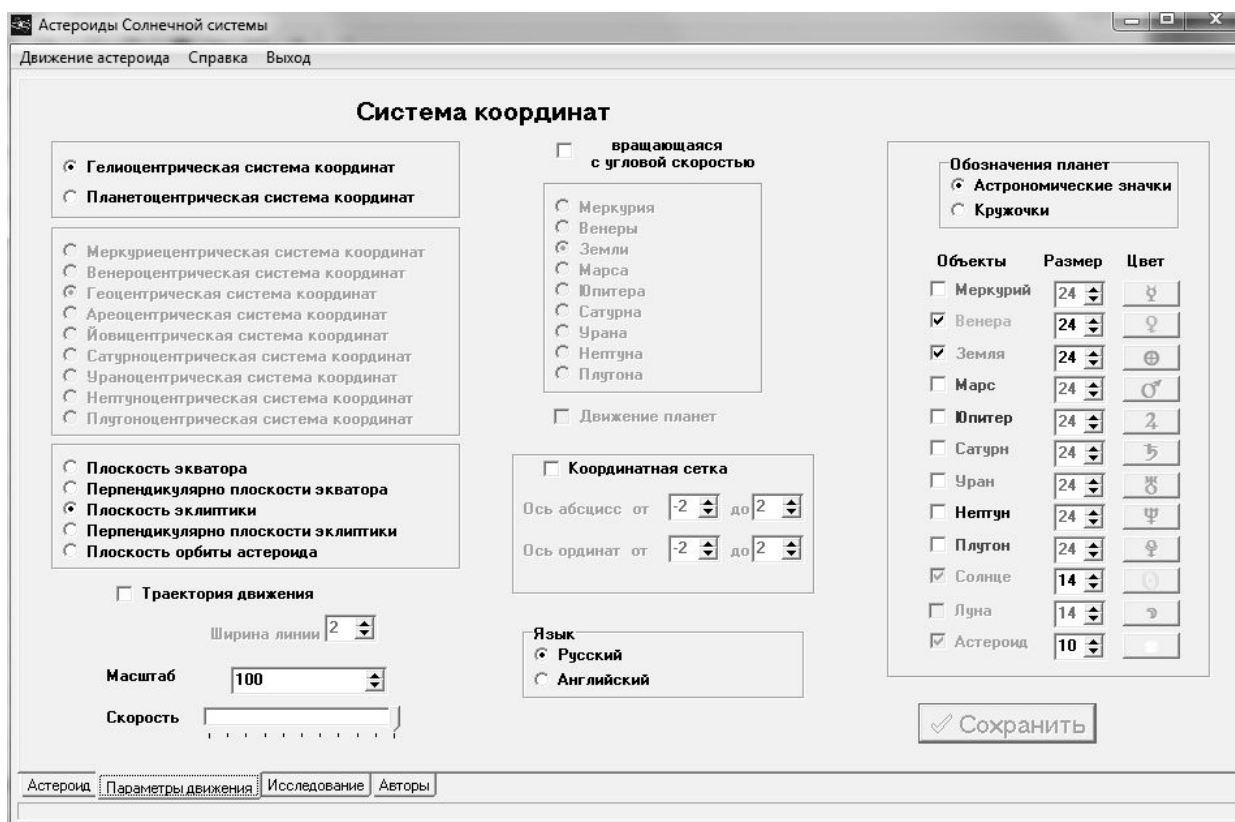


Рис. 1. Интерфейс подсистемы «Ассоль»

На данной вкладке также присутствует кнопка «Сохранить», предназначенная для ввода данных в подсистему.

На вкладке «Исследование» нужно выбрать:

- учитываемые возмущения;
- параметры точности и порядок метода интегрирования;
- форму дифференциальных уравнений движения;
- планеты, резонанс с которыми будет определяться;
- порядок резонанса и границы резонансной щели;
- параметры сближений для внешних и внутренних планет.

Для принятия подсистемой введенных данных необходимо нажать кнопку «Сохранить».

Вкладка «Авторы» содержит информацию об авторах подсистемы.

После того как все необходимые параметры приняты подсистемой, можно перейти в демонстрационный режим, воспользовавшись пунктом меню «Движение астероида». Демонстрационный режим позволяет просматривать движение астероида и больших планет в различных системах координат. В качестве примера работы подсистемы на рис. 2 показана орбита астероида 2011 AG5. В процессе демонстрации движения на экран выдается информация о сближениях астероида с большими планетами и Луной и о прохождении через резонанс. Файлы результатов содержат информацию о координатах объекта, оценках точности, сближениях с большими планетами и Луной и орбитальных резонансах.

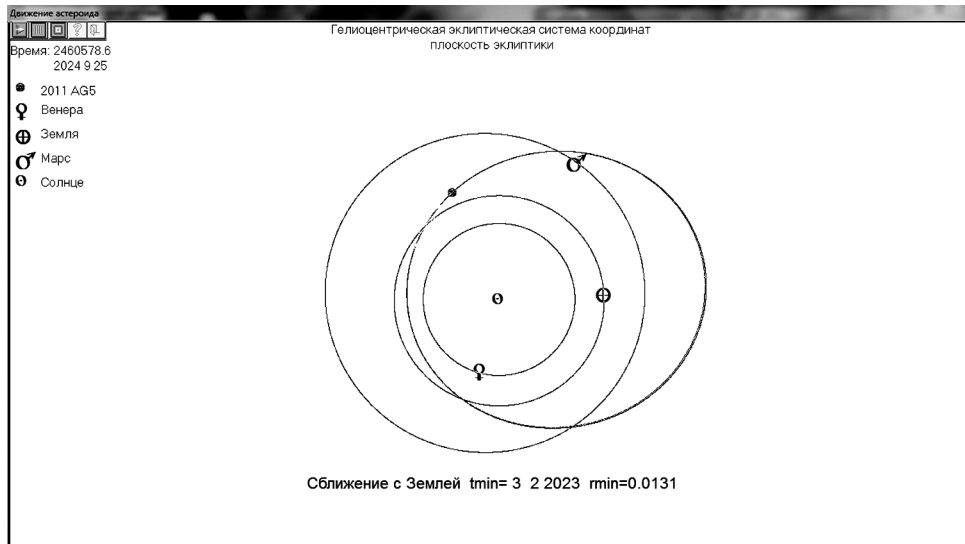


Рис. 2. Демонстрационный режим работы подсистемы «Ассоль»

#### 4. Подсистема «Наблюдения»

Подсистема «Наблюдения» предназначена для работы с позиционными оптическими наблюдениями астероидов, она позволяет осуществлять представление наземных и космических позиционных наблюдений, улучшать орбиту астероида, вычислять коэффициент нелинейности задачи оценивания начальной области и получать начальную доверительную область бутстрэп-методом. Интерфейс подсистемы представлен на рис. 3.

Как видно на рис. 3, для работы подсистемы необходимо ввести следующую информацию:

- путь к фонду координат больших планет DE405;
- имя астероида;
- файл наблюдений;
- номер начальной и конечной точки ансамбля частиц;
- начальный и конечный моменты времени;
- координаты и компоненты скорости астероида на начальный момент времени;
- учитываемые возмущения;
- необходимо ли проводить улучшение орбиты и исключать наблюдения;
- нужно ли определять коэффициент нелинейности задачи оценивания начальной области;
- необходимо ли генерировать тестовые частицы бутстрэп-методом.

После того как необходимые данные введены, можно нажать кнопку «ОК» и начнется процесс представления наблюдений и улучшения орбиты. Результаты работы подсистемы заносятся в соответствующие файлы, которые содержат следующую информацию:

- представление наблюдений;
- полученные в результате улучшения координаты, компоненты скорости, элементы орбиты и ковариационная матрица;
- число обусловленности Тодда ;
- коэффициент нелинейности задачи оценивания начальной области.

#### 5. Подсистема «Distribution»

Подсистема «Distribution» позволяет посмотреть, как распределены наблюдения на орбите астероида. Входной файл подсистемы содержит следующие данные:

- начальные координаты и компоненты скорости астероида;
- путь к фонду координат больших планет и файлу наблюдений объекта;
- масштаб изображения;
- планеты, орбиты которых будут показаны;
- параметры координатной сетки.

В качестве примера работы подсистемы на рис. 4 представлены орбиты астероида 2007 VK184 и планет земной группы в проекции на орбитальную плоскость. Кружочками на орбите астероида показаны наблюдения этого объекта.

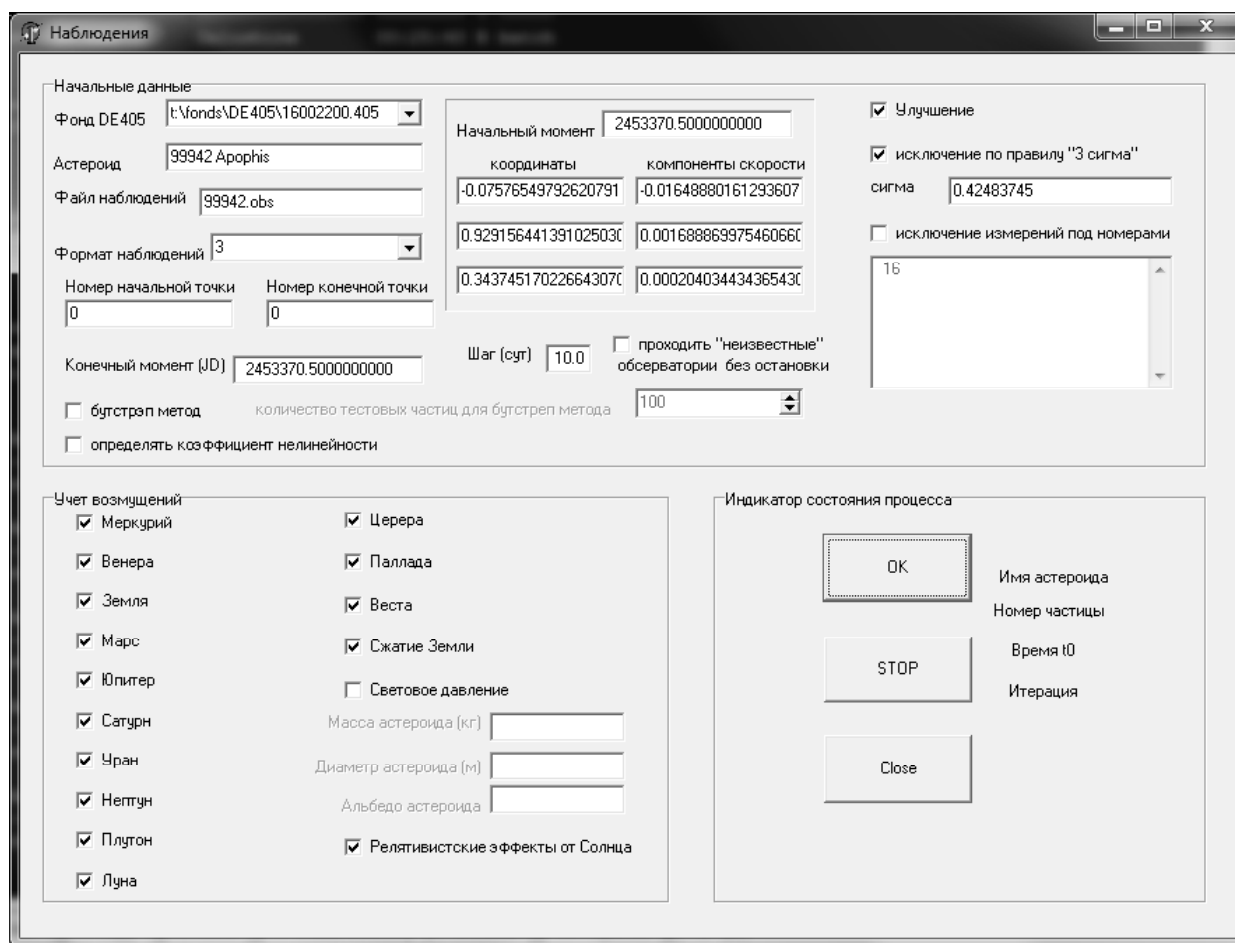


Рис. 3. Внешний вид подсистемы «Наблюдения»

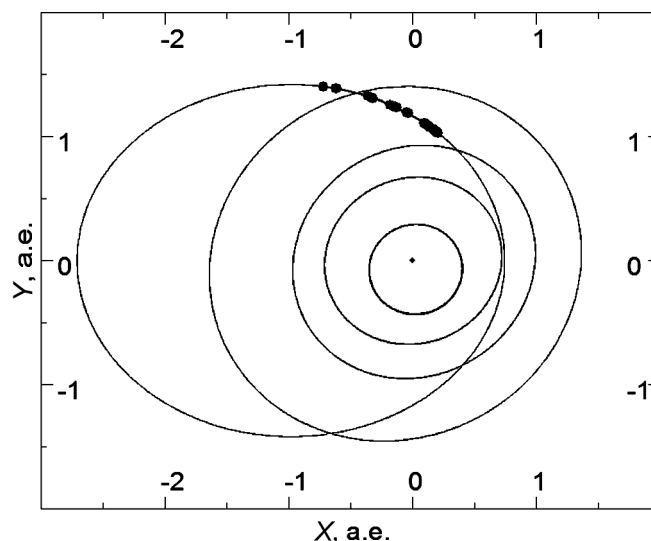


Рис. 4. Распределение наблюдений астероида 2007 VK184 по орбите

### 6. Подсистема «Ансамбль частиц»

Подсистема «Ансамбль частиц» предназначена для генерации ансамбля тестовых частиц с помощью алгоритма Холецкого на основе полученных в результате улучшения координат и компонент скорости номинальной частицы и ковариационной матрицы. Данная подсистема разработана в двух вариантах – в среде Delphi и на языке ФОРТРАН. Первый вариант отличается удобным интерфейсом (рис. 5), второй – возможностью работать с расширенной разрядной сеткой (128 бит). Входными данными в обоих случаях являются координаты и компоненты скорости номинальной

частицы, полная или диагональная ковариационная матрица и количество необходимых тестовых частиц, выходными – координаты и компоненты скорости тестовых частиц.

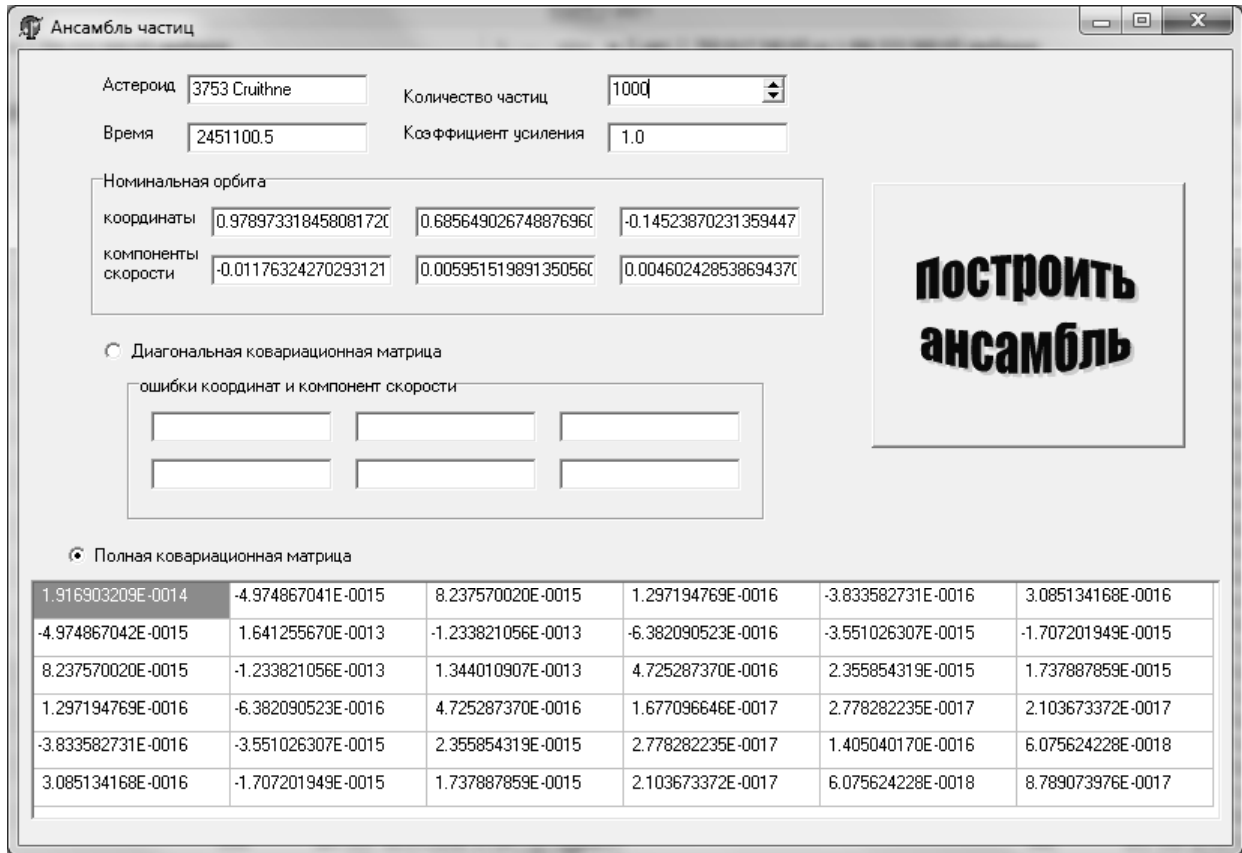


Рис. 5. Внешний вид подсистемы «Ансамбль частиц»

## 7. Подсистема «Evolution»

Подсистема «Evolution» предназначена для исследования орбитальной эволюции реальных и виртуальных астероидов. Во входные файлы подсистемы необходимо внести следующие данные:

- путь к фонду координат больших планет DE405, DE406 или DE408 (в зависимости от интервала исследования);
- имя исследуемого объекта;
- начальный и конечный моменты времени;
- расстояние, определяющее сближения для внутренних и внешних планет;
- резонансные соотношения;
- интервал выдачи координат, элементов орбиты и резонансных характеристик;
- параметры интегратора;
- учитываемые возмущения;
- координаты и компоненты скорости астероида и тестовых частиц на начальный момент времени.

Выходные файлы содержат следующую информацию:

- координаты, компоненты скорости и элементы орбиты с заданным шагом;
- оценки точности интегрирования;
- значения резонансной щели и критического аргумента с заданным шагом;
- моменты сближения и минимальные расстояния до планеты.

## 8. Подсистема «Графики»

Подсистема «Графики» разработана для упрощения анализа полученных результатов. Она позволяет автоматизировать процесс построения графиков эволюции резонансной щели, критического аргумента и параметра MEGNO для большого числа реальных или виртуальных астероидов. Входной информацией для подсистемы являются файлы с данными об эволюции резонансных ха-

рактических характеристик и характеристики хаотичности, интерфейс представлен на рис. 6. Для каждой характеристики необходимо указать:

- нужно ли строить ее график;
- путь к файлу данных;
- пределы изменения оси ординат и абсцисс (если установить значение «auto», то они определяются автоматически по входным данным);
- размер символов и толщина линии.

Кроме того, нужно задать масштаб изображения и номер начальной точки ансамбля.

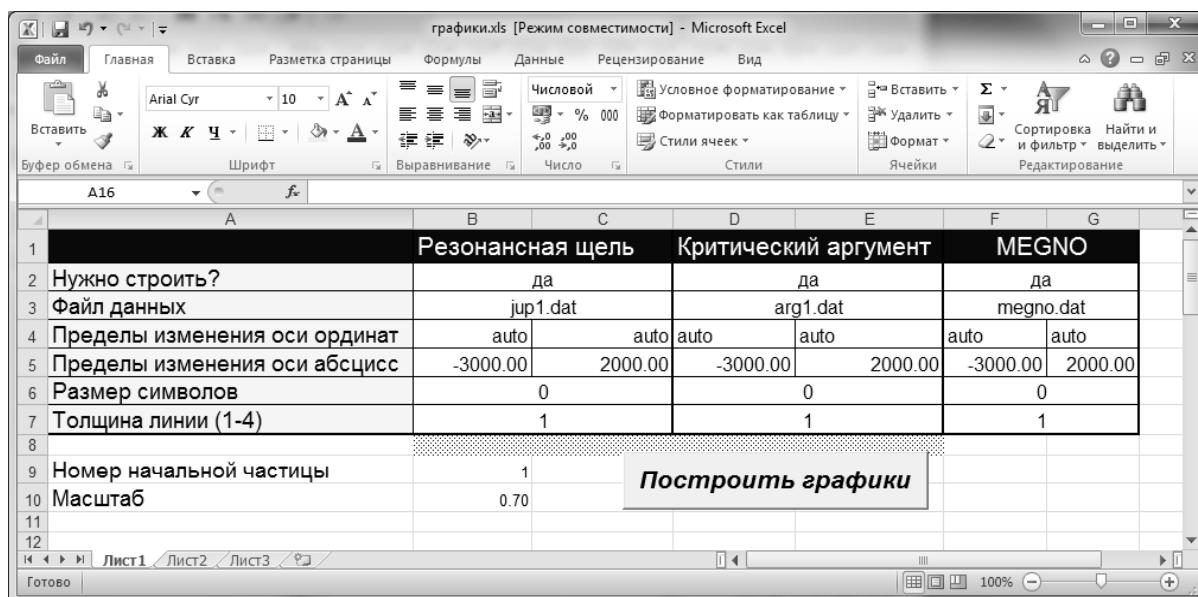


Рис. 6. Внешний вид подсистемы «Графики»

После того как введены все параметры, необходимо воспользоваться кнопкой «Построить графики» для запуска макроса, написанного на языке Visual Basic for Application. В процессе работы происходит построение графиков на листе 2, результаты записываются в документ MS Word. Пример результата работы программы представлен на рис. 7. Получаемые графики позволяют анализировать поведение резонансных характеристик и характеристик хаотичности.

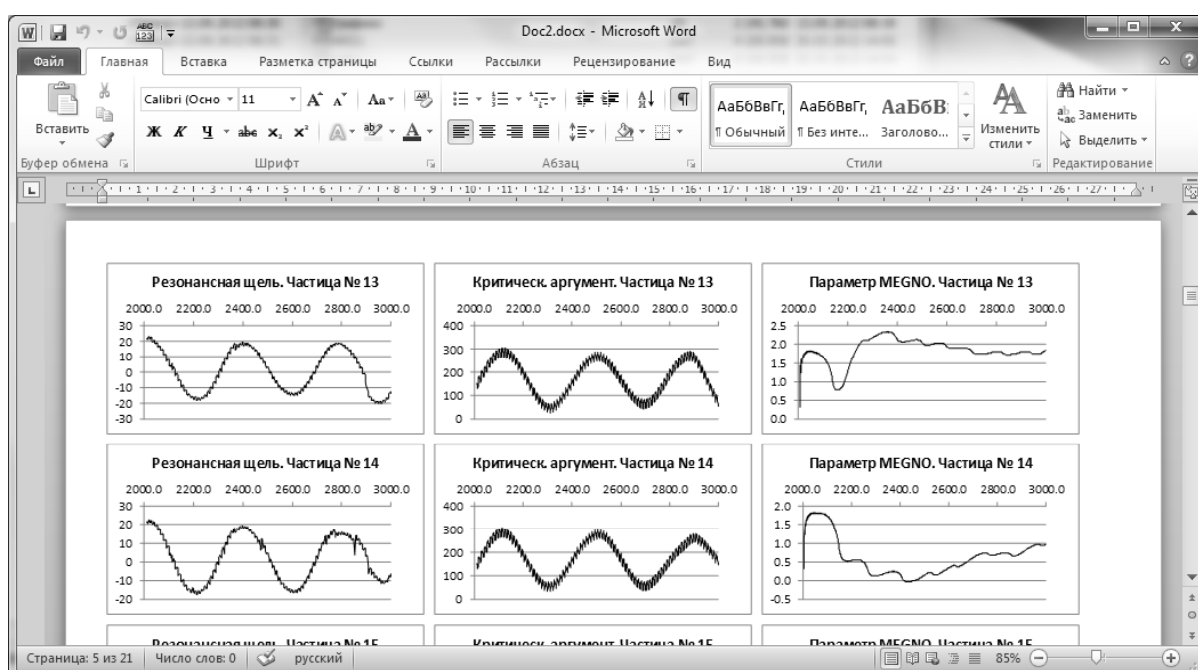


Рис. 7. Результат работы подсистемы «Графики»

### Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлено описание программного комплекса, разработанного для исследования вероятностной орбитальной эволюции астероидов. Программный комплекс состоит из ряда подсистем, которые позволяют проводить всестороннее изучение движения астероидов. С помощью данного комплекса нами были проведены исследования ряда астероидов, имеющих очень тесные сближения с Землей [14, 15] и движущихся в окрестности резонансов низких порядков с большими планетами [16]. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами других авторов.

Подсистема «Ассоль» в 2003 г. внедрена в учебный процесс и научно-исследовательскую работу кафедры астрономии и геодезии и Астрономической обсерватории УрГУ (в настоящее время УрФУ) и Астрономического института им. В.В. Соболева СпбГУ, в 2011 г. на данную подсистему получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617538. В 2012 г. получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617858 на подсистемы «Наблюдения» и «Ансамбль частиц».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Everhart E. // 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.
2. Шапорев С. Д. Оценка корреляционной функции ошибок наблюдений статистическими методами бутстрепа и складного ножа // Препринт ИТА РАН. – СПб.: ИТА РАН, 1996. – № 62. – 25 с.
3. Desmars J., Arlot S., Arlot J.-E., et al. // Astron. Astrophys. – 2009. – V. 62. – P. 321–330.
4. Шефер В. А. Регуляризирующие и стабилизирующие преобразования в задаче исследования движения особых малых планет и комет: автореф. дис. ... к.ф.-м.н. – Казань, 1986. – 13 с.
5. Гребеников Е. А., Рябов Ю. А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. – М.: Наука, 1978. – 128 с.
6. Cincotta P.M., Girdano S.M., and Simo C. // Physica D. – 2003. – V. 182. – P. 151–178
7. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю. // Труды Междунар. науч.-практич. конф. «Вторые Окуневские чтения»: в 2-х т. Теоретическая и прикладная механика. – СПб.: БГТУ, 2001. – Т. 2. – С. 204–213.
8. Galushina T. and Bykova L. // Resonances, stabilization, and stable chaos in hierarchical triple systems / eds. V.V. Orlov, A.V. Rubinov. – St. Petersburg: St. Petersburg Univ. Press., 2008. – P. 5–11.
9. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю. // Изв. вузов. Физика. – 2007. – Т. 50. – № 12/2. – С. 13–19.
10. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 10/2. – С. 12–19.
11. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю., Ниганова Е. Н. // Современная баллистика и смежные вопросы механики (Материалы Всерос. науч. конф.). Томск, 17–19 ноября 2009 г. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2009. – С. 306–307.
12. Раздымакина О. Н. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 6/2. – С. 31–38.
13. Bowell E., Muinonen K., and Wasserman L. H. A public-domain asteroid data base. In Asteroids, Comets, Meteors. – Dordrecht, Netherlands: Kluwer, 1994. – P. 477–481.
14. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю. // Космические исследования. – 2010. – Т. 48. – № 5. – С. 419–426.
15. Галушина Т. Ю. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 6/2. – С. 118–126.
16. Галушина Т. Ю. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 4(16). 2012. – С. 61–69.

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: astrodep@niipmm.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.10.12.

## THE APPLICATION SUITE «IDA» FOR INVESTIGATION OF DYNAMICS OF ASTEROIDS

L.E. BYKOVA, T.Yu. GALUSHINA, A.P. BATURIN

Tomsk State University, Tomsk, Russia

This paper is devoted to description of the application suite «IDA» that is designed for investigation of dynamics and probability orbital evolution of asteroids. The features of this suite are multifunctionality, high efficiency and convenient interface.