

## АНАЛИЗ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОРБИТ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

### Введение

Объектами исследования в данной работе выступили группы малых тел (МТ) Солнечной системы:

- база индивидуальных орбит метеоров Харьковского национального университета радиоэлектроники (ХНУРЭ) – 159788 метеоров;

- метеорные потоки и ассоциации (МПА), выявленные по результатам многолетних радиолокационных наблюдений метеоров в Харькове [1], – выборка содержит 5160 средних орбит;

- астероиды, орбиты которых сближаются с орбитой Земли (NEA – near Earth asteroids) [2], на момент вычислений обнаружено более 13 тысяч.

Малые тела Солнечной системы, сближающиеся с орбитой Земли, были выбраны в качестве объекта исследований (а не, например, астероиды Главного пояса, количество которых на несколько порядков выше) по следующим основным причинам:

1) эти объекты не сближаются с другими планетами – только с Землей – поэтому все особенности эволюции распределений их орбит обусловлены только влиянием Земли;

2) таких объектов в Солнечной системе в настоящее время насчитывается уже десятки тысяч;

3) точность определения параметров орбит очень велика.

Важной фундаментальной проблемой является задача изучения существования в распределениях элементов орбит периодических составляющих. Данные вопросы возникли давно. Проводились как теоретические исследования [3 – 8], так и попытки экспериментального подтверждения. Малые объемы выборок орбит МТ, доступные на то время, сделали невозможным получение статистически достоверных результатов. Актуальность темы исследований вызвана областями потенциального применения полученных результатов. Прежде всего это вопросы, связанные с распределением вещества МТ в околоземном пространстве, решение которых позволит усовершенствовать существующие подходы к прогнозированию и выявлению кометно-астероидной опасности для Земли, а также к оцениванию вероятности столкновения МТ с искусственными спутниками и аппаратами космических миссий.

На сегодняшний день количество известных планетных систем превосходит тысячу [9], а с учетом того, что, согласно общепринятым теориям, все они образовались под действием одинаковых сил и явлений [10], то распределение вещества в Солнечной системе можно рассматривать как одну из реализаций этих общих процессов. В таком случае хаотическое распределение вещества включает в себе детерминированную составляющую.

Цель работы – исследовать тонкую структуру распределения орбит малых тел Солнечной системы.

### Схема анализа

Орбита любого МТ в планетарной системе полностью определяется пятью кеплеровыми элементами ( $a$  – большая полуось орбиты,  $e$  – эксцентриситет,  $i$  – наклонение,  $\omega$  – аргумент перигелия,  $\Omega$  – долгота восходящего узла орбиты). Первые два элемента определяют форму орбиты, остальные – ориентацию относительно базовой системы координат.

При анализе распределения МТ Солнечной системы в пятимерном пространстве элементов орбит важен способ приведения исходных выборок орбит к форме, пригодной для применения хорошо разработанных методов анализа случайных сигналов. Задача упрощается тем, что нет необходимости одновременно анализировать все составляющие, но возможен анализ проекции данных на интересующие нас оси.

Как известно, самым информативным параметром из всех пяти является большая полуось орбиты  $a$ , поэтому основное внимание уделялось анализу этого параметра. Одним из способов приведения исходных данных к виду, пригодному для применения методов анализа случайных сигналов, является построение *интервальных рядов вариации* (РВ) интересующего нас параметра (например, большой полуоси).

Интервальный ряд вариации – упорядоченная совокупность интервалов варьирования значений случайной величины с соответствующими частотами попаданий в каждый из них значений величины.

Для построения РВ весь интервал варьирования наблюдаемых значений случайной величины разбивается на ряд частичных интервалов и подсчитывается частота попадания значений величины в каждый частичный интервал. Графически РВ изображаются в виде *гистограмм численности*.

Получаемый дискретный ряд в общем случае является нестационарным и содержит мощную постоянную и низкочастотные составляющие. Задача спектрального представления РВ решается в два этапа: 1) устранение тренда и 2) спектральный анализ остаточного ряда.

### Астероиды NEA

На момент проведения анализа выборка околоземных астероидов NEA насчитывала 13814 объектов [2]. Гистограмма численности распределения орбит NEA по большой полуоси для  $N = 200$  интервалов группирования приведена на рис. 1, а. Диапазон изменения значений был ограничен сверху величиной  $a_{\max} = 3.5$  а.е., что привело к уменьшению анализируемой выборки до 13783 орбит.

Сплошной линией на рис. 1, а изображен тренд  $u(a)$ , полученный путем сглаживания РВ сплайном, в основе которого лежит полином степени  $k = 5$ . Количество узлов сплайна –  $l = 20$ . Более подробно о выборе методов устранения трендов и оценки их эффективности см. [11, 12].

Условимся называть *остаточным рядом* ряд, образованный путем вычитания тренда  $u(a)$  из ряда значений гистограммы численности  $n(a)$ :

$$y(a) = n(a) - u(a). \quad (1)$$

В общем случае остаточный ряд является смесью шумовой компоненты  $\varepsilon(a)$  и полезного сигнала  $x(a)$ , который с учетом особенностей объекта исследования может быть гармонической составляющей или же их набором на неизвестных частотах.

Остаточный ряд распределения астероидов NEA по большой полуоси приведен на рис. 1, б.

График спектральной плотности мощности (СПМ) остаточного ряда распределения астероидов NEA по большой полуоси приведен

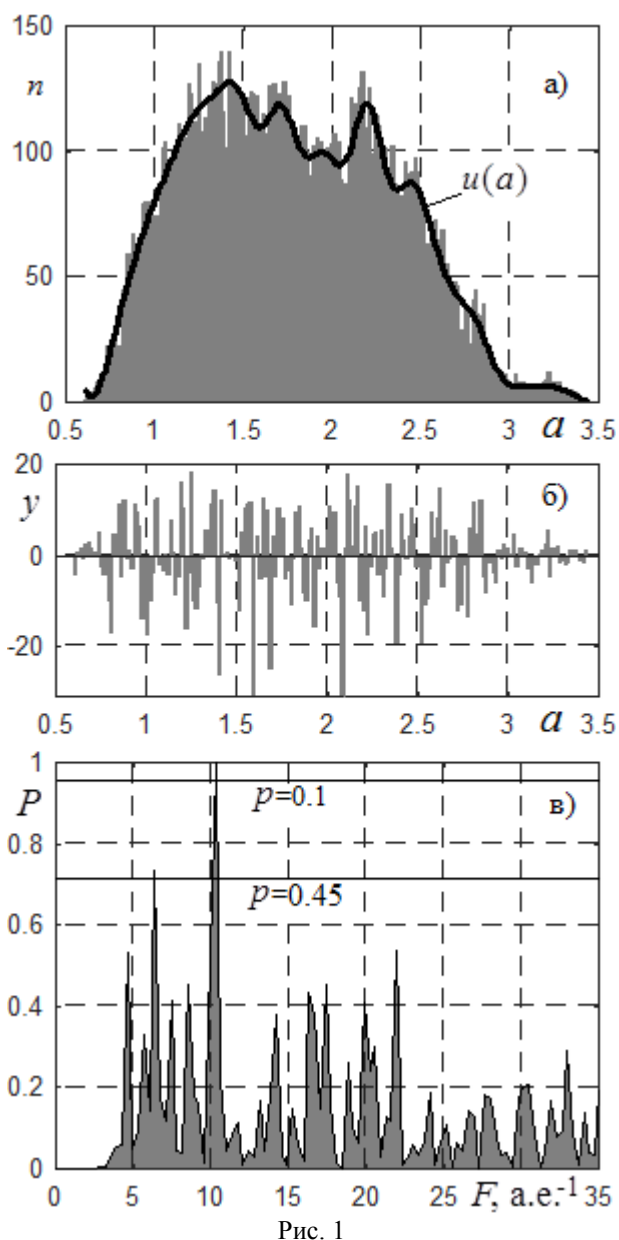


Рис. 1

на рис. 1, в. Оценка СПМ получена на основе периодограммного метода. Максимум спектрального представления ряда находится на частоте  $F \approx 10.3 \text{ а.е.}^{-1}$  и имеет уровень значимости, превосходящий  $p = 0.1$ . Следующая по величине частотная компонента имеет существенно меньший уровень значимости –  $p = 0.45$ , и, вероятно, является шумом. С учетом сказанного спектральная составляющая на частоте  $F \approx 10.3 \text{ а.е.}^{-1}$  была отнесена к категории полезного сигнала, т.е. с высокой долей вероятности является характерной особенностью распределений околоземных астероидов NEA по большой полуоси.

На графиках СПМ приведены оценки вероятностей того, что периодограмма *ряда случайной величины*, имеющего ту же длину, что и интересующий нас ряд, содержит спектральную составляющую с амплитудой большей или равной амплитудам для указанных уровней значимости  $p$ . При заданной длине ряда  $N$  и уровне значимости  $p$  лишь отклонения периодограммы (или спектральной плотности), нормированной к ее среднему значению  $\bar{P}(F)$ , превосходящие  $X_p$ , могут считаться значимыми [13]:

$$X_p = -\ln \left[ 1 - (1-p)^{\frac{2}{N-2}} \right]. \quad (2)$$

Необходимое значение амплитуды периодограммы для заданного значения параметра  $p$  и длины ряда  $N$ :

$$P = X_p \cdot \bar{P}(f). \quad (3)$$

Все графики периодограмм нормированы к единице, поскольку в первую очередь стоит задача выявить факт наличия «полезного» сигнала в анализируемых РВ и провести оценку частоты обнаруженных гармонических составляющих. Более того, интерпретация и вложение конкретного физического смысла в энергию или мощность, содержащуюся в тех или иных компонентах спектра, выходит за рамки данной работы. В случае периодограммы  $N = 200$  ряда распределения астероидов NEA –  $\bar{P}(f) \approx 0.141$ ,  $N = 200$ ,  $p = 0.1$  (значение  $p$  было подобрано экспериментально):

$$X_p = -\ln \left[ 1 - (1-0.1)^{\frac{2}{200-2}} \right] \approx 6.85, \quad (4)$$

$$P = 6.85 \cdot 0.141 \approx 0.966. \quad (5)$$

Для всех других периодограмм уровни значимости вычислялись аналогично.

### Метеоры ХНУРЭ

Выборка метеоров, выявленных по результатам радиолокационных наблюдений в Харькове с помощью метеорной автоматической радиолокационной системы (МАРС), содержит 159788 орбит. Так же, как и в случае распределений астероидов NEA, диапазон изменения большой полуоси был ограничен сверху значением  $a_{\max} = 3.5 \text{ а.е.}$ . Это привело к отсеиванию части орбит и уменьшению размера выборки до 148029 элементов.

Распределение орбит метеоров по большой полуоси для  $N = 200$  интервалов группирования приведено в виде гистограммы численности на рис. 2, а. Сплошной линией обозначен тренд  $u(a)$ , построенный путем сглаживания ряда  $n(a)$  сплайном ( $k = 5$ ,  $l = 20$ ). Данное распределение, в отличие от аналогичного распределения астероидов NEA, имеет более стремительный рост от 0 до максимального значения с последующим плавным убыванием. Остаточный ряд РВ метеоров МАРС приведен на рис. 2, б, соответствующая ему периодо-

грамма – рис. 2, в. Максимум СПМ находится на частоте  $F \approx 14.1 \text{ а.е.}^{-1}$  и имеет практически шумовой уровень значимости –  $p = 0.65$ , что не позволяет отнести его к категории полезного сигнала.

### Метеорные потоки и ассоциации ХНУРЭ

Выборка МПА, выявленных по результатам радиолокационных наблюдений метеоров в Харькове системой МАРС, содержит 5160 средних орбит. Ограничение диапазона изменения большой полуоси значением  $a_{\max} = 3.5 \text{ а.е.}$  привело к уменьшению размера выборки до 4994 элементов.

Распределение орбит МПА по большой полуоси для  $N = 200$  интервалов группирования приведено в виде гистограммы численности на рис. 3, а. Сплошной линией обозначен тренд  $u(a)$ , построенный путем сглаживания ряда  $n(a)$  сплайном ( $k = 5, l = 20$ ). Периодограмма остаточного ряда (рис. 3, б) – приведена на рис. 3, в. Максимум СПМ находится на частоте  $F \approx 12.6 \text{ а.е.}^{-1}$  и имеет высокий уровень значимости –  $p = 0.01$ , что позволяет отнести данную компоненту к категории полезного сигнала.

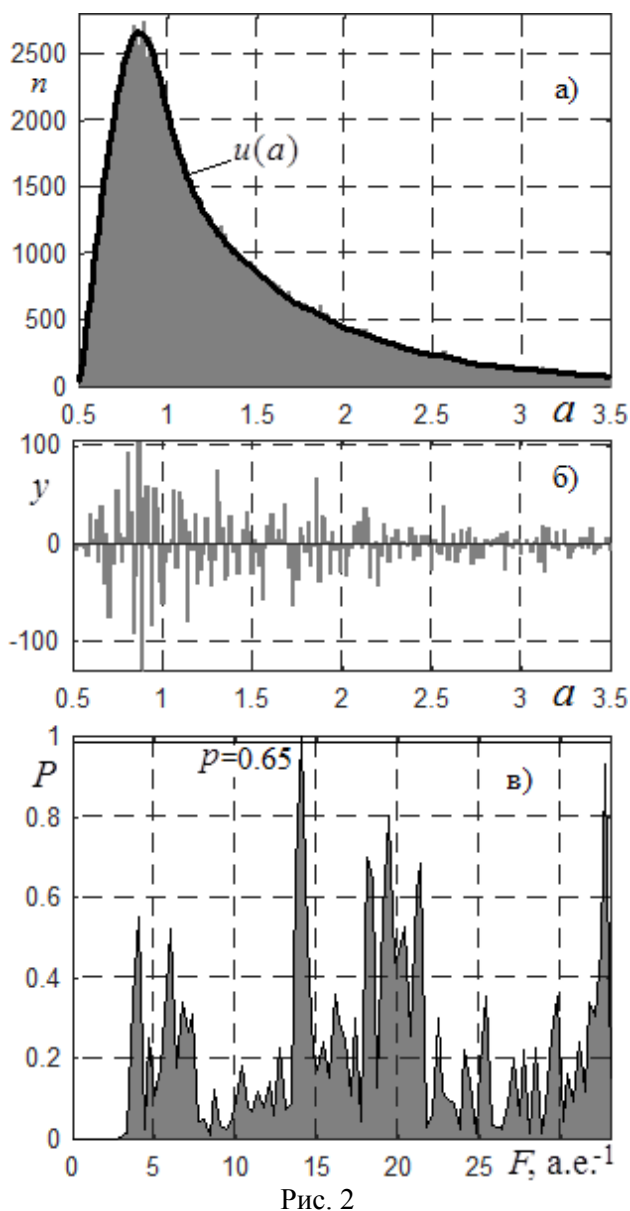


Рис. 2

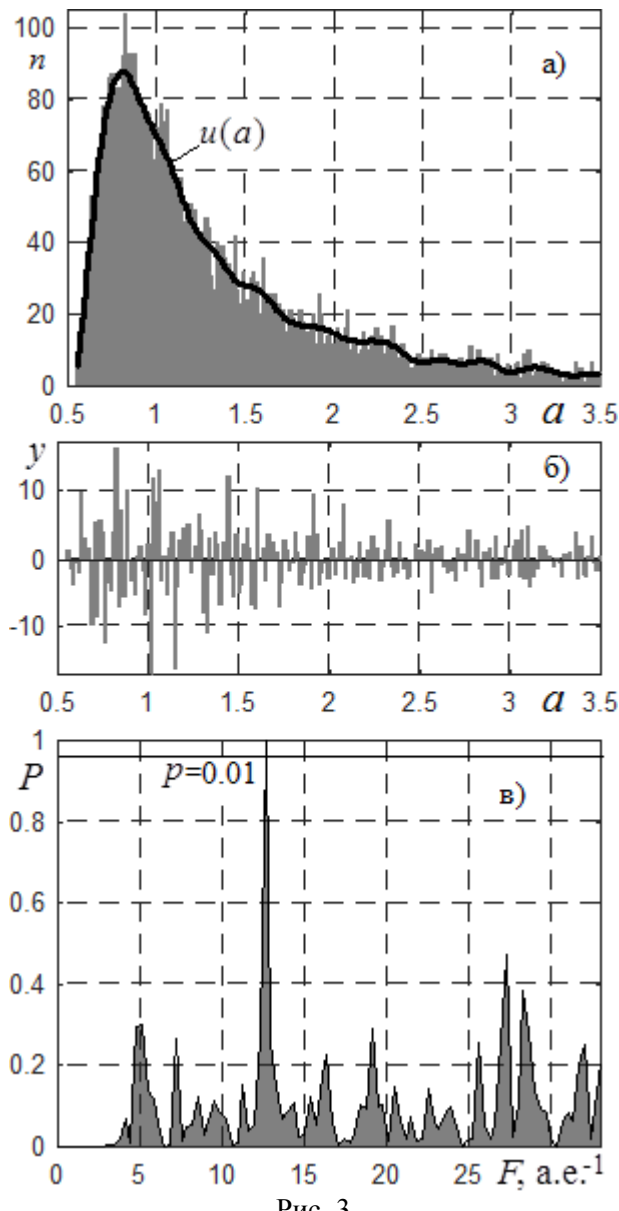


Рис. 3

## Фазовые диаграммы остаточных рядов

При изучении рядов данных можно найти приближенное значение  $\hat{T}$  истинного периода  $T$ , а затем построить фазовую диаграмму (ФД), т.е. последовательные отрезки ряда  $\{y_k\}$  длиной  $\hat{T}_0$ . Эти отрезки накладывают друг на друга и рассматривают зависимость  $y_k$  от фазы [13]:

$$x_k = \text{FR} \left( \frac{\zeta_k - \zeta_0}{\hat{P}_0} \right), \quad (6)$$

где  $\text{FR}(z)$  – дробная часть числа  $z$ ,  $\zeta_0$  – произвольно выбранное значение аргумента.

Остается рассмотреть зависимость  $y_k$  от  $x_k$ . Эта зависимость и является ФД ряда. Цель построения ФД заключалась в том, чтобы приближенно определить форму истинной периодической зависимости  $y(x)$ .

Очевидно, что при  $\hat{T}_0$ , близком к истинному периоду  $T_0$ , точки на ФД располагаются наиболее упорядоченным образом. В противном случае разброс точек будет обусловлен не только неизбежным шумом, но и причинами систематического характера, т.е. будет превышать разброс, соответствующий сворачиванию ряда с периодом  $T_0$ . Таким образом, разброс точек на ФД может служить показателем близости какого-либо значения периода к истинному периоду  $T_0$ .

На рис. 4, а приведена фазовая диаграмма остаточного ряда распределения астероидов NEA по большой полуоси для периода:

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{\hat{F}_0} \\ \hat{T}_0 = \frac{1}{10.3 \text{ а.е.}^{-1}} \approx 0.097 \text{ а.е.} \quad (7)$$

Сглаженные полиномом  $k=6$  степени средние значения ФД изображены сплошной линией.

На рис. 4, б приведена ФД метеоров МАРС базы ХНУРЭ для периода:

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{14.1 \text{ а.е.}^{-1}} \approx 0.071 \text{ а.е.} \quad (8)$$

ФД остаточного ряда распределения МПА МАРС для периода:

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{12.6 \text{ а.е.}^{-1}} \approx 0.079 \text{ а.е.} \quad (9)$$

приведена на рис. 4, в.

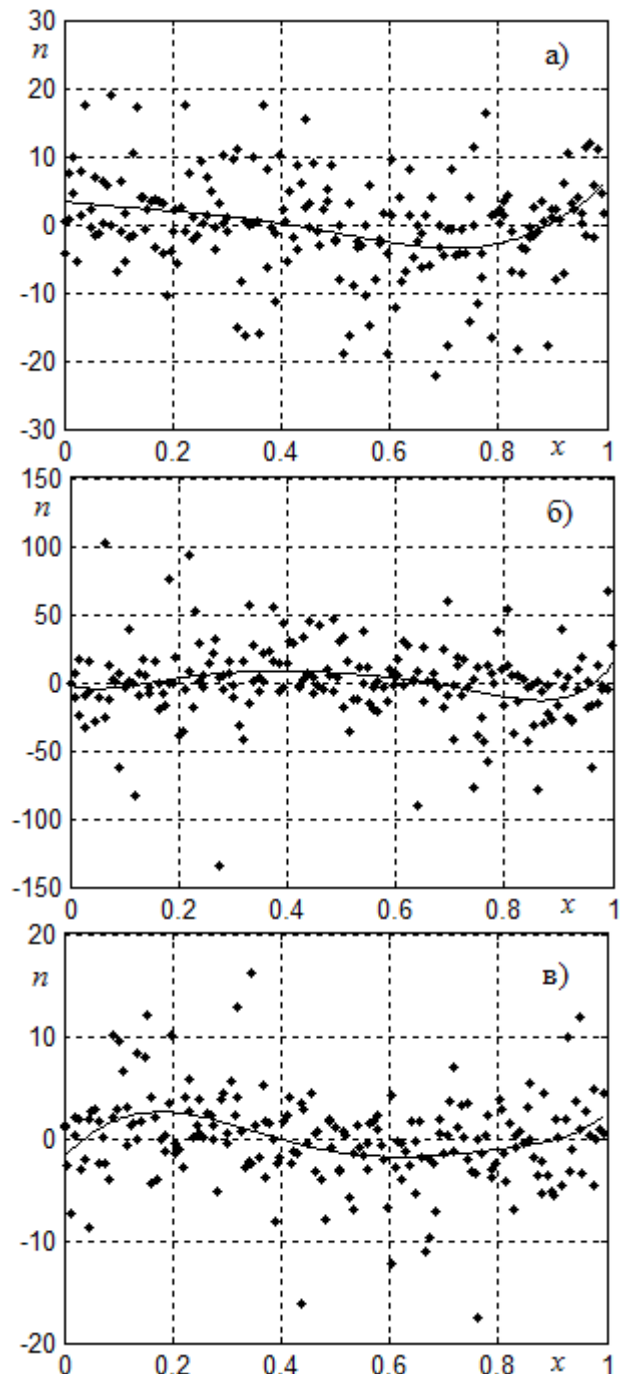


Рис. 4

Все ФД являются зашумленными. Сглаженное среднее значение ФД распределения орбит МПА по большой полуоси – рис. 4, *в* – визуально соответствует гармоническому колебанию, что хорошо согласовывается с периодограммой этого ряда – рис. 3, *в* – на которой максимум СПМ является узко локализованным по частоте и имеет острый пик. Форма сглаженных значений ФД метеоров и астероидов NEA является более сложной, что может указывать как на их высокую зашумленность, так и на наличие гармонических колебаний на других частотах, кроме тех, для которых были построены эти ФД.

## Выводы

Без сомнения, исследуемые распределения орбит МТ в некоторой степени не являются хаотичными, а содержат "упорядоченность", проявляющуюся в наличии областей с повышенной и пониженной концентрацией орбит, что хорошо просматривается в наличии гармонических составляющих на периодограммах распределений разных групп МТ Солнечной системы по большой полуоси.

Проявления тонкой структуры распределений орбит МТ Солнечной системы, выявленные в результате спектрального анализа РВ, не могут быть прямым подтверждением части теорий и гипотез, которые описывают макроквантовые явления в Солнечной системе [4 – 8]. В первую очередь из-за того, что выявленные периодические составляющие в РВ МПА и NEA имеют разные частоты, т.е. значение основной гармоники не сохраняется в пределах действия общего притягивающего центра – Солнца. Такое несоответствие можно объяснить слабой изученностью данного вопроса с точки зрения физико-математического аппарата, а также отсутствием общепринятой теории по макроквантовым явлениям малых тел Солнечной системы.

Большая выраженность гармонической составляющей и меньшая зашумленность спектра РВ МПА МАРС в сравнении со спектрами РВ NEA и РВ метеоров может быть подтверждением другой гипотезы, согласно которой хотя бы часть известных метеорных потоков и ассоциаций являются не результатом дезинтеграции ядер комет, а результатом захвата отдельных метеорных тел областями пространства с повышенной стабильностью орбит, вследствие которого в процессе эволюции образуется метеорный поток из частиц, генетически не связанных между собой.

**Список литературы:** 1. *Волощук Ю.И.* Метеорные потоки и ассоциации, выявленные по результатам многолетних радиолокационных наблюдений метеоров в Харькове / Ю.И. Волощук, Д.Ю. Горелов ; под ред. Ю.И. Волощука. – Х. : Изд-во «НТМТ», 2011. – 383 с. 2. *Каталог* элементов орбит околоземных объектов NEO Электронный ресурс. – Режим доступа: [http://neo.jpl.nasa.gov/cgi-bin/neo\\_elem](http://neo.jpl.nasa.gov/cgi-bin/neo_elem). 3. *Волощук Ю.И.* Метеоры и метеорное вещество / Ю.И. Волощук, Б.Л. Кашеев, В.Г. Кручиненко; АН УССР. Главная астрономическая обсерватория. – К. : Наук. думка, 1989. – 296 с. 4. *Гулак Ю.К.* Соизмеримости и макроквантовые явления в Солнечной системе. I. Проблемы, принципы, модель. – К. : Ин-т теоретической физики АН УССР, 1986. – 27с. 5. *Гулак Ю.К.* Соизмеримости и макроквантовые явления в Солнечной системе. II. Стабильные механические структуры. – К. : Ин-т теоретической физики АН УССР, 1986. – 28с. 6. *Quiroga R.J.* Angular momenta in the Solar System. – *Earth, Moon and Planets*. – 1984. – 30 N2. – P. 102-121. 7. *Quiroga R.J.* Angular momenta in the Solar System. II – *Earth, Moon and Planets*. – 1984. – 30 N2. – P. 102-121. 8. *Чечельницкий А.М.* Экстремальность, устойчивость, резонансность в астродинамике и космонавтике / А.М. Чечельницкий. – М. : Машиностроение, 1980. – 312 с. 9. *Каталог экзопланет* [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://exoplanet.eu/catalog/>. 10. *Matsuo T.* Planetary Formation Scenarios Revisited: Core-Accretion versus Disk Instability / T. Matsuo, H. Shibai, T. Ootsubo // *The Astrophysical Journal*. – 2007. – Vol. 662, Issue 2. – P. 1282-1292. 11. *Черкас Ю.В.* Оценивание трендов применительно к распределениям околоземных астероидов по большой полуоси / Ю.В. Черкас, Ю.И. Волощук // *Радиотехника*. – 2013. – Вып. 174. – С. 58 – 65. 12. *Cherkas Yu. V.* Effectiveness of trend estimation methods / Yu. V. Cherkas // *The advanced science journal*. – 2014. – Issue 10. – P. 64 – 67. 13. *Теребиж В.Ю.* Анализ временных рядов в астрофизике / В.Ю. Теребиж. – М. : Наука, 1992. – 392 с.