

*Handwritten signature*

Институт прикладной астрономии РАН  
Российский фонд фундаментальных исследований  
Санкт-Петербургский научный центр РАН

**Всероссийская конференция  
«Астероидно-кометная опасность – 2005»  
(АКО – 2005)**

**3–7 октября 2005, Санкт-Петербург**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**All-Russian conference  
«Asteroid-Comet Hazard – 2005»  
(ACH – 2005)**

**3–7 October 2005, St. Petersburg**

**MATERIALS of the CONFERENCE**

Санкт-Петербург  
2005

## Некоторые вопросы, касающиеся проблемы астероидно-кометной опасности

Д. Ф. Лупишко<sup>1</sup>, Ж. А. Пожалова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИ астрономии Харьковского национального ун-та им. В. Н. Каразина, Украина

<sup>2</sup>НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория», Украина

### Введение

Накопление и осмысление новых наблюдательных данных о малых телах Солнечной системы и связанных с ними теоретических оценок, обнаружение следов все большего числа космических катастроф на земной поверхности, недавние факты столкновения кометы Шумейкера-Леви с Юпитером — все это произвело существенный сдвиг в восприятии научными кругами и общественностью той реальной угрозы, которую представляют собой столкновения крупных космических тел с Землей. Возрастает понимание, что такие столкновения играли важную роль в эволюции жизни на Земле в прошлом и могут оказать решающее влияние на нее в будущем. Основная роль в процессе столкновения крупных космических тел с Землей принадлежит астероидам групп Аполлона и Атона, находящихся на нестабильных орбитах с перигелийными расстояниями  $q \leq 1,017$  а.е. Сейчас в США, Европе, Японии и Австралии выполняется несколько программ по обнаружению астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и существенным достижением в решении проблемы астероидно-кометной опасности (АКО) можно считать то, что к настоящему времени обнаружено и каталогизировано около 70 % АСЗ размерами  $\geq 1$  км. В двух центрах (в Италии и США) ведутся предвычисления возможных тесных сближений и вероятности столкновений вновь открываемых АСЗ по мере уточнения их орбит. Параллельно изучаются физические свойства этих объектов.

### О важности исследования физических свойств АСЗ

Последствия столкновения зависят прежде всего от кинетической энергии АСЗ, т.е., его скорости относительно Земли и массы. Если относительная скорость сталкивающихся тел определяется параметрами их орбит, то массу ударника (АСЗ) из наземных наблюдений можно оценить только косвенным путем, зная его размеры и предполагая ту или иную плотность и пористость вещества. Для определения размеров и формы астероида используют данные фотометрических, поляриметрических, радиометрических, радарных и других наблюдений. А оценку объемной плотности астероида можно получить, определив его тип (S-силикатный, C-углистый, M-металлический и др.) и исполь-

зая имеющиеся данные о плотности соответствующих метеоритных аналогов и пористости вещества астероидов. Тип астероида надежнее всего определяется из спектральных наблюдений, хотя фотометрические измерения цвета, а также фазовые зависимости блеска и поляризации, тоже пригодны для этой цели. Тип астероида (т.е. его плотность и прочность) и размер очень важны также для моделирования процесса взаимодействия его с атмосферой Земли (либо это фрагмент ядра кометы или тело типа «rubble piles», которое распадется в атмосфере Земли, либо же это прочный астероид М-типа, который выдержит торможение в атмосфере и достигнет поверхности Земли как одно тело). От этого сценария зависят масштабы ожидаемых последствий. Для предотвращения столкновения путем, например, посадки на астероид КА с термоядерным зарядом нужно знать форму тела, скорость и направление вращения, ориентацию оси вращения в пространстве. Эти данные получают из фотометрических и радарных измерений. Таким образом, нужны комплексные наземные, а лучше и космические, наблюдения и измерения.

### **Насколько контролируема ситуация с оценками реальной опасности столкновений**

Ясно, что контролируемой ситуация может быть лишь тогда, когда будут каталогизированы все опасные (~100 м и крупнее) АСЗ. На данный момент, к счастью, мы не знаем такого АСЗ, который действительно угрожал бы столкновением с Землей. Но совершенно очевидно, что реально они могут существовать среди множества еще не обнаруженных объектов и, возможно, даже среди уже каталогизированных. Вспомним случай с АСЗ 2004 MN4. Этот 400-м объект был открыт 19 июня и переоткрыт 18 дек. 2004 г. Используя наблюдения за несколько ночей, обе автоматические системы (в НАСА и в Пизанском ун-те, Италия) независимо определили возможное столкновение его с Землей 13 апреля 2029 г. Имея новые наблюдения 23 декабря 2004 г., итальянская система определила лишь сближение астероида с Землей до расстояния 780 тыс. км. А. Milani подчеркивал, что при данной точности определения орбиты не исключено столкновение с вероятностью в 1/170, что соответствует показателю опасности по Туринской шкале  $TS=2$ . 24 декабря улучшенная орбита давала вероятность столкновения уже 1/60, а показатель опасности подпрыгнул до  $TS=4$ , чего раньше никогда не было. Астрономы продолжали наблюдать и уже 27 декабря D. Yeomans (США) доложил, что ситуация улучшилась и астероид пройдет от Земли на расстоянии 60 тыс. км. Очередное уточнение орбиты по радарным данным 27–30 января 2005 г. показало, что минимальное расстояние уменьшится до 36350 км (высота геостационаров!), но столкновение исключается. В этой связи хочется надеяться, во-первых, что последующие уточнения орбиты (особенно перед сближением в 2029 г.) не ухудшат еще больше ситуацию, а во-вторых, что это сближение тоже не при-

ведет к эволюции орбиты в направлении неизбежного столкновения. Подобная ситуация, но с любым конечным исходом, может иметь место с каждым открываемым АСЗ.

### **Падение крупных космических тел в воду**

Такое событие может вызвать цунами, представляющее зловещую угрозу для жителей океанского побережья. Тому пример — цунами 26 дек. 2004 г. у побережья юго-восточной Азии, унесшее около 300 тыс. жизней. Причина его — подвижка плит океанского дна, совсем небольшое по сравнению с падением крупного АСЗ высвобождение энергии, которое породило волну у побережья высотой  $\leq 10$  м. В последние годы США и Япония заметно активизировали разработку и внедрение службы оповещения о зарождающемся цунами. Ведутся работы по моделированию возникновения цунами и их последствий. Ученые ун-та в Санта Круз в Калифорнии промоделировали падение в океан в 580 км от Атлантического побережья США нашумевшего астероида 1950 DA ( $D \sim 1$  км), столкновение с которым может произойти 16 марта 2880 г. Высота волны в эпицентре получилась равной 120 м, за 2 часа она достигает пляжей США, а через 8 часов волна высотой 10–15 м достигает берегов Европы. Вероятность этого события оценена в 0.3 %, но им пренебрегать нельзя, так как уровень потерь (количество жертв) может быть грандиозным. Подобных событий на Земле по оценкам специалистов за последние 65 млн. лет было порядка 600. Таким образом, цунами — это весьма вероятное и грозное последствие столкновений.

Рабочая группа «Comet/Asteroid Impacts and Human Society»

Под таким названием 29 ноября–1 декабря 2004 г. на Канарских о-вах (Тенерифе) состоялась РГ с участием представителей различных научных направлений. Обсуждался широкий круг вопросов, включая место АКО в ряду других возможных природных катастроф, вероятность и частота столкновений с телами разных размеров, масштабы возможных последствий, неопределенности в оценке размеров ударников и, следовательно, в частоте столкновений с ними, социально-экономические и политические последствия, роль прессы и др. В ходе активных дискуссий были уточнены следующие принципиальные величины: вклад комет составляет не более 4 % от общего числа потенциально опасных столкновений; минимальный размер астероида, способного вызвать глобальную катастрофу, составляет 2 км, а частота таких столкновений — одно в  $10^6$  лет; на момент проведения РГ доля открытых АСЗ размером более 1 км составила около 65 %; поиски таких АСЗ обходятся в 4 млн долларов США ежегодно, а поиски меньших объектов вплоть до 100 м в поперечнике будут стоить в 10 раз больше. Принято решение опубликовать результаты дискуссий и рекомендации международным и национальным организациям в «white paper», а доклады участников — в трудах РГ.

### **Заключение**

АКО — это не только межнациональная проблема, которую надо решать объединенными усилиями многих стран, но и междисциплинарная, и поэтому должна решаться специалистами разных научных и технических направлений. Как только астрономы определяют, что данный астероид (или комета) находится на траектории сближения и столкновения с Землей, он тут же становится не столько астрономическим, сколько военным («террористическим») объектом. И чтобы предотвратить или минимизировать последствия столкновения, необходимы совместные усилия военных, астрономов, геофизиков, специалистов по динамике атмосфер и гидродинамике, математиков, экономистов и др. Вот почему проведение конференций по проблеме АКО с участием специалистов различных наук представляется весьма необходимым.

### **On some problems concerning the asteroid-comet hazard**

**D. F. Lupishko<sup>1</sup> and Zh. A. Pozhalova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Astronomy of Karazin Kharkov National University, Ukraine

<sup>2</sup>Research Institute "Nikolaev Astronomical Observatory", Ukraine

Due to the special programs of the Spaceguard Survey, initiated in the USA, Europe, Japan and Australia, the rate of near-Earth object discovery greatly increased and as a result about 65–70 % of NEAs larger than 1-km in diameter have been already detected. Such points as i) an importance of the study of NEA physical properties, ii) the situation with estimates of the real hazard of the discovered NEA, iii) about the impact of large NEAs into the ocean and generated tsunamis are considered in this presentation in detail. Some information on the Workshop "Comet/Asteroid Impacts and Human Society" which was held at Tenerife (Canary Islands) on 29 Nov.–1 Dec., 2004 is given. The Workshop concluded in particular, that the threshold diameter of NEA for global catastrophe is around 2 km and an impact frequency of such events is about once per million years; the comets represent less than 4 % of the potential hazard of NEOs impacts.

## Physical properties and mineralogy of near-Earth asteroids from the point of view of asteroid hazard problem

D. F. Lupishko<sup>1</sup>, M. Di Martino<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy of Karazin Kharkov National University, Ukraine

<sup>2</sup>INAF — Osservatorio Astronomico di Torino, Italy

### Introduction

The near-Earth asteroids (NEAs) are the objects of a special interest from the point of view not only of the basic science but of the applied science as well. On one hand, the sources of their origin, the mechanisms of transfer of the main-belt orbits into the Earth-approaching ones, their life-time, relationships with comets and meteors, etc. are very important for the solution of the cosmogonic problems of asteroid belt and the Solar system as a whole. On the other hand, there is no doubt that the Earth-crossing asteroids are bodies which strike our planet occasionally and therefore, they are a real threat to the Earth's civilization. Hence, the asteroid-comet hazard as well as the forthcoming prospects of NEA utilization as the potential sources of raw materials in the nearest to the Earth space are directly related to the solving of the global applied problems of the humanity survival.

About 3,300 NEAs have been discovered until now and the rate of their discovery is continuously increasing. Recently the binary systems, bodies with superfast axis rotation, the parent bodies of the ordinary chondrites have been detected among the NEAs. Nevertheless, at present the rate of study of NEA physical properties remains noticeably behind the rate of their discovery and with respect to all population of discovered NEAs our data on their physical properties are becoming more and more scanty. That is why the study of physical properties of NEAs is now one of the priority directions of the Solar system investigations.

### Sizes, masses and densities

The main difference of NEAs from main-belt asteroids (MBAs) is their relatively small sizes. The review [1] contains the most complete data-set on the NEA sizes obtained on the basis of photometric, polarimetric, radiometric, radar and other observations. The largest object of this population is amor-asteroid 1036 Ganymed (38.5 km) while the smallest cataloged ones are about 10 m across. Thus, NEAs are the smallest individually observable bodies in the Solar system. Among the Earth-crossing asteroids, which in principle can collide with the Earth, 1866 Sisyphus is the largest object with the diameter of about 9 km. The size distribution of NEA population can be approximated by a power law with an exponent  $b=3.5$  which evidences in favour of the collisional origin of these bodies.

The estimates of bulk densities of NEAs are available only for a few of them [2]. The most accurate determination of bulk density was obtained due to a space mission NEAR for 433 Eros ( $2.67 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ ) which corresponds well to its S-type mineralogy taking into account its possible porosity of  $\sim 30\%$ . For other four objects (one of C-type, others of unknown types) there are only preliminary estimates from analysis of them as binaries. It is curious that all of them are within  $1.4\text{--}1.9 \text{ g/cm}^3$ , that is closer to densities of C-type objects which are not common among NEAs. For the largest Earth-crossover 1866 Sisyphus (S-type) the calculated mass is about  $10^{12}$  tons. The collision of it with the Earth at the velocity of 20 km/s leads to the energy release of about  $2 \cdot 10^{30} \text{ erg} = 5 \cdot 10^7 \text{ Mt}$  (Tunguska explosion was only about 15 Mt). Fortunately the frequency of such events is  $10^{-7} \div 10^{-8}$  per year.

### Shapes and axis rotations

The numerous data obtained by ground-based observations and NEAR-mission are evidence of the irregular and elongated shapes of NEAs. But the analysis of data [3] shows that NEAs on the average are elongated to the same extent as MBAs of corresponding sizes. Observations showed a striking diversity of NEAs shapes from nearly spherical (1943 Anteros, 2102 Tantalus) to very elongated (433 Eros, 1620 Geographos, 1865 Cerberus) and bifurcated (4179 Toutatis) and to contact-binary ones (4769 Castalia). The most elongated asteroid among observed NEAs is 1865 Cerberus ( $D=1.2 \text{ km}$ ), its axis ratio  $a:b$  is estimated to be equal to 3.2. The opinion that NEAs have more exotic shapes than MBAs is mainly due to the fact that we know practically nothing about the shapes of MBAs having dimensions of  $\leq 1 \text{ km}$ .

The distributions of the rotation rates of the NEAs, in comparison with that for MBAs of comparative sizes, show that both asteroid samples have similar medians equal to 4.80 and 4.34 rev/day, respectively, and similar dispersions. At the same time the mean rotation rate of the large MBAs is equal to  $2.90 \pm 0.12 \text{ rev/day}$ . Thus, on the average NEAs rotate practically in the same manner as the small MBAs and considerably faster than large ones. The fastest rotators among the km-sized NEAs have rotation periods equal to 1–2 hrs (1998 EC3, 2000 EB14, 1566 Icarus), but the slowest ones rotate with the periods equal to 1–2 hundred hrs (4179 Toutatis – 129.8 hrs, 3102 Krok – 147.8 hrs, 1998 QR52 – 235 hrs). Recently among the small NEAs (30–100 m across) the objects with superfast rotation were discovered, among them are 2000 PH5 – 0.203 hrs, 2000 AG6 – 0.077 hrs, 2000 DO8 – 0.022 hrs. It is clear that such fast-spinning bodies are beyond the rotational breakup limit for aggregates like “rubble piles” and they are monolithic fragments.

The second peculiarity is that among this population there are objects with very complex and non-principal axis rotation (“tumbling” asteroids). Among them is 4179 Toutatis ( $D \sim 3 \text{ km}$ ) which rotates around the longest axis and this axis has a

precession motion with a period of 176.4 hrs. Two other objects 3288 Seleucus and 4486 Mithra show two or more harmonic frequencies in their lightcurves.

### **Taxonomy and mineralogy**

Almost all taxonomic classes of MBAs are represented among classified near-Earth asteroids. About 70% of NEAs belong to S and Q classes (silicate), and the observed number of them exceeds the number of C (carbon) and other low-albedo NEAs as much as a factor of 5. But in the main belt the situation is quite opposite: 75 % of C-types and 15 % of S-types. Taking into account the observational selection effects it was shown [3] that the relative number of low-albedo objects among NEAs is ~2.5 times less than in the main belt. Today, having more complete data-set on NEA taxonomy, the calculations give the number not 2.5 but 4. The most immediate explanation of this result is that the NEAs are coming mostly from the inner regions of the main belt, where the relative abundance of the low-albedo objects is small.

Most of the NEAs represent differentiated assemblages. Among them there are objects with monomineral silicate composition and purely metallic ones. For example, small asteroid 1915 Quetzalcoatl appears to have little or no olivine, and diogenitic meteorites (Mg-pyroxenes) are the best analogs of it. 3199 Nefertity has the same content of pyroxene and its composition corresponds to that of stony-iron meteorites pallasites. At present we know three M-objects and one of which, 6178 1986 DA, has radar albedo clearly indicating the real metallic composition. 3103 Eger with very high albedo (0.53) corresponds to assemblages of iron-free silicate minerals, such as enstatite. Ten NEAs classified as V-class, have spectra identical to those of main-belt asteroid 4 Vesta, which is known to be a differentiated body and is covered by basaltic (pyroxene-rich) material. About 20 % of classified NEAs belong to Q-types which are the ordinary chondrite-like objects. The variety of taxonomic classes among NEAs reflects the diversity of their surface mineralogy and an overall analogy with the MBAs. Taking into account their small sizes, one might infer that they are the fragments of much larger differentiated bodies of main belt which were later injected in the present orbits by complex dynamics.

### **Optical properties and surface structure**

The ground-based observation and space-mission data clearly demonstrate that NEAs display the same optical properties as MBAs (see Table below). The whole range of NEA albedos (0.04÷0.60) is the same as that of MBAs and it corresponds to basically the same mineralogy within both populations. Besides, the strict similarity of phase coefficient  $\beta$ , negative polarization  $P_{\min}$ , polarization slope  $h$  and inversion angle  $\alpha_{\text{inv}}$ , which are also related to the surface structure, gives evidence of the similar surface structures at submicron scale.



Mean optical parameters of S-type asteroids in V-band [1]

Parameter	NEAs	N	MBA, D>100 km	N
Albedo polarimetric	0.183±0.011	9	0.177±0.004	28
Albedo radiometric	0.190±0.014	23	0.166±0.006	27
U-B (mag)	0.445±0.013	30	0.453±0.008	28
B-V (mag)	0.856±0.013	31	0.859±0.006	28
$\beta$ (mag/deg)	0.029±0.002	9	0.030±0.006	18
$P_{\min}$ (%)	0.77±0.04	3	0.75±0.02	28
$h$ (%/deg)	0.098±0.006	9	0.105±0.003	23
$\alpha_{\text{inv}}$ (deg)	20.7±0.2	6	20.3±0.2	18

The data of radiometry, polarimetry and direct imaging of Eros evidence that most of NEAs are covered with regolith of low thermal inertia. But the conditions of formation, accumulation and evolution of regolith on NEAs are different from those on MBAs. As a result, the regolith of NEAs tends to be more coarse-grained than that of MBAs and *a fortiori* of the Moon. Radar data evidence that NEA surfaces are rougher than surfaces of large MBAs at the scale length of decimeters and meters and the porosity of NEA surface material is about 30-50%. Besides that the data of radiometric measurements evidence that about 30% of NEAs with dimensions range from 0.5 to 5 km satisfy a thermophysical model of an asteroid with high-thermal-inertia surface, such as bare rock that is, without developed regolith. The images of one of the largest NEAs 433 Eros obtained by the NEAR-spacecraft in 2000-2001 showed a surface covered with large number of craters of different sizes and a lot of boulders and rocks. Ground-based radar observations also showed that even the relatively small NEA 4179 Toutatis and 1999 JM8 (D~3 km both) are cratered at about the same extent as MBAs 951 Gaspra and 243 Ida.

The physical properties and mineralogy of NEAs clearly indicate that the main asteroid belt is the principal source of their origin. The recent estimates based on the study of physical properties of NEAs, MBAs and comets evidence that no more than 10% of NEAs have a cometary origin.

#### References

11. Binzel R. P., Lupishko D. F., Di Martino M., Whiteley R. J., Hahn G. J. Physical properties of near-Earth objects. *Asteroids III* (W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. Binzel, eds.) Tucson: Univ. Arizona Press. 2002. P. 255-271.
12. Hilton J. L. Asteroid masses and densities. *Ibid.* P. 103-112.
13. Lupishko D. F., Di Martino M. Physical properties of near-Earth asteroids. *Planet. Space Sci.* 1998. V. 46. No. 1. P. 47-74.