

УДК 521.182; 523.44
DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2025.72.49-51>

Анатолій КАЗАНЦЕВ, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0009-0008-9700-6500
e-mail: ankaz@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ТІСНІ ЗБЛИЖЕННЯ АСТЕРОЇДІВ ІЗ ЗЕМЛЕЮ В НАСТУПНІ ДЕСЯТЬ РОКІВ

Вступ. Розрахунки тісних зближень астероїдів із Землею важливі як для виявлення потенційно небезпечних, так і для можливості детальнішого їхнього вивчення на близьких відстанях.

Методи. Головна суть методу – це точні розрахунки еволюції орбіт астероїдів. Самі орбіти відбираються з каталогу Міжнародного центру малих планет. Цей каталог є найповнішою базою всіх малих тіл і містить найточніші елементи їхніх орбіт.

Результати. За розрахунками виявлено 15 астероїдів із розмірами більше 100 м, які в наступні десять років будуть наближатися до Землі на геоцентричну відстань, що становить менше 0.02 а.о. Умови зближення із Землею астероїда Апофіс у 2029 р. практично не будуть відрізнятися від порохованих майже 20 років тому.

Висновки. В наступні десять років 15 нумерованих на сьогодні астероїдів з розмірами 100 м і більше наближатимуться до Землі на відстань, що менша за 0.02 а.о. Три з них може бути видно неозброєним оком.

Розраховані умови зближення Апофіса із Землею дуже близькі до розрахунків 20-річної давності. Тому можна стверджувати, що і до зближення 2029 р. орбіта астероїда навряд чи зазнає помітних змін. Це також означатиме, що 2029 р. Апофіс омине ті "замкові щілини", проходження через які можуть загрожувати зіткненням астероїда із Землею в 2036 р. чи в 2037 р.

Ключові слова: астероїди, орбіти, зближення, Апофіс.

Вступ

Розрахунки тісних зближень астероїдів із Землею потрібні для виявлення потенційно небезпечних серед них у наступні роки, що важливо для підготовки до їхніх можливих зіткнень із Землею. Крім того, за тісних зближень можна детальніше досліджувати фізичні властивості таких тіл.

Зрозуміло, що подібні розрахунки проводили раніше інші автори. Однак повторні обчислення мають сенс як з урахуванням нових відкритих астероїдів, так і з уточненням елементів орбіт раніше відкритих тіл.

Методи

Загальний масив астероїдів у каталозі MPC на 5 травня 2025 р. містить 1 444 931 орбіту. Серед них орбіт із достатньо точними елементами (орбіт нумерованих астероїдів) налічується 793 066.

Були відібрані орбіти нумерованих астероїдів із перигелійними відстанями $q < 1.3$ а.о., та з афелійними відстанями $Q > 0.7$ а.о. Тобто орбіти, що можуть наближатися до орбіти Землі на відстань менше 0.3 а.о. – АНЗ. Також у процесі відбору встановлено обмеження за абсолютною зоряною величиною: $H < 23$. Така умова приблизно відповідає розмірам астероїдів $D > 100$ м. Кількість відібраних орбіт становила 3 268.

Була обчислена еволюція всіх відібраних орбіт на наступні 10 років. Розрахунки проведено за методом та програмою, описаною в (Kazantsev, 2002). В цій роботі показано, що похибка обчислень еволюції орбіт астероїдів на інтервалі близько 50 000 р. становить 10^{-7} а.о. по великій півосі, 10^{-7} по ексцентриситету та 10^{-5} градуси по кутових елементах. Такі значення відповідають точності елементів орбіт у каталозі MPC.

Під час розрахунків у цій роботі враховано збурення від восьми планет, а також від Церери, Палади та Вести. Також узято до уваги релятивістські ефекти в русі перигеліїв орбіт.

Результати

За результатами розрахунків відібрано астероїди, які в наступні 10 років будуть наближатися до Землі на геоцентричну відстань $\Delta < 0.02$ а.о. Така мала геоцентрична відстань обрана тому, що навіть невеликі збурення від не врахованих у розрахунках тіл (напр., зіткнення з дрібними тілами) можуть змінити розраховані значення Δ до критично малих.

Результати розрахунків подано в табл. 1. Для кожного астероїда наведено: номер за каталогом MPC, абсолютна зоряна величина H , дата та всесвітній час мінімального зближення, видима зоряна величина m і геоцентрична відстань Δ в а.о. на момент зближення.

З табл. 1 бачимо, що в наступні кілька років до Землі наблизяться три АНЗ, які може бути видно неозброєним оком. Але в Україні можна буде бачити лише один – 99942 Апофіс. Астероїд 137108 при видимому блиску менше 7^m із території України буде над горизонтом уже на світлому небі. Астероїд 153814 при зближенні – для України – буде весь час під горизонтом через від'ємне схилення.

Варто зауважити, що видима зоряна величина обчислена для моделі сферичної форми астероїда. Тому в реальності значення m може бути дещо відмінним від зазначеного в табл. 1.

Еволюцію орбіт усіх наведених у табл. 1 астероїдів варто відслідковувати в майбутньому, як потенційно небезпечних тіл, що можуть загрожувати зіткненнями із Землею.

Окремо варто звернути увагу на Апофіс. Цей астероїд відкрили в грудні 2004 р. І вже через кілька днів були отримані перші оцінки, за якими він може мати дуже тісне зближення із Землею 2029 р. (Giorgini et. al., 2008). А через два роки після уточнення його орбіти ці оцінки повністю підтвердилися. Стало зрозуміло, що в квітні 2029 р. він справді має наближитися до Землі на дуже малу відстань (геоцентрична відстань Δ близько 38 000 км).

Перші значення мінімальних геоцентричних відстаней Апофіса на квітень 2029 р. за розрахунками в різних установах були близькими між собою. Наприклад, за розрахунками в університеті Аресибо, США, $\Delta = 38\,013$ км \pm 574 км (Sansaturio, & Arratia, 2008). За розрахунками в АН Польщі $\Delta = 38\,619$ км \pm 631 км (Królikowska et. al., 2009).

© Казанцев Анатолій, 2025

Таблиця 1

Дані про зближення відібраних астероїдів із Землею

Номер	<i>H</i>	Дата	UT	<i>m</i>	Δ , а.о.
35396	17.01	26.10.2028	07.00	6.8	0.006218
99942	19.00	13.04.2029	22.00	1.8	0.000258
137108	18.05	07.08.2027	07.00	5.7	0.002612
152637	17.87	27.06.2026	11.00	9.2	0.017151
153814	18.28	26.06.2028	03.00	4.9	0.001666
172678	18.90	24.06.2033	00.00	10.8	0.016782
216985	21.34	14.03.2036	12.00	12.3	0.011393
292220	19.39	26.01.2029	07.00	10.5	0.008189
418416	20.30	25.11.2029	00.00	12.3	0.018839
437844	21.19	11.07.2030	21.00	13.1	0.016841
440212	18.97	30.09.2028	14.00	10.7	0.014989
445305	19.82	11.09.2030	16.00	12.0	0.014690
462550	19.63	01.03.2032	04.00	12.1	0.015989
528807	22.07	01.04.2029	06.00	14.6	0.018777
536531	20.46	06.10.2035	09.00	11.8	0.007482

Тоді ж у деяких роботах вказано на існування так званих "замкових щілин". Замкова щілина – це досить вузький діапазон геоцентричних відстаней Апофіса (близько 600 м) при зближенні в квітні 2029 р. За проходження через замкову щілину орбіта астероїда зміниться так, що вже 2036 р. чи 2037 р. він може реально зіткнутися із Землею. За оцінками в Аресібо, для можливого зіткнення Апофіса із Землею 2036 р. значення Δ у 2029 р. має становити близько 36 823 км.

За розрахунками в АН Польщі відповідні значення Δ мають бути в інтервалі 36824–36829 км. Крім того, в польській АН виконали оцінювання і для можливого зіткнення Апофіса в 2037 р. Така можливість може настати, якщо 2029 р. геоцентрична відстань Апофіса буде в інтервалі 40433–40439 км. В цих розрахунках (як і в розрахунках інших установ) наведено оцінки значень Δ в 2029 р. для можливих зіткнень і після 2037 р. Але зрозуміло, що більш пізні зіткнення нині не дуже актуальні. Адже після зближення 2029 р. еволюцію орбіти Апофіса на майбутнє буде пораховано точніше.

Виконані тут розрахунки еволюції орбіти Апофіса за елементами на епоху 5 травня 2025 р. показують, що 2029 р. мінімальна геоцентрична відстань астероїда становитиме близько 38 600 км (табл. 2).

Таблиця 2

Дані про зближення Апофіса із Землею в 2029 р.

Дата	UT	Азимут	Висота	<i>m</i>	Δ , км
13.04.29	17.00	301.00	-3.14	3.5	117285
13.04.29	18.00	315.23	8.46	3.1	96191
13.04.29	19.00	333.66	20.16	2.6	75697
13.04.29	20.00	1.56	31.29	2.0	56847
13.04.29	21.00	49.94	35.70	1.5	42336
13.04.29	22.00	109.28	18.36	1.8	38596
13.04.29	23.00	150.66	-1.54	3.2	48320
14.04.29	00.00	179.76	-8.66	4.6	65374
14.04.29	01.00	202.48	-7.52	5.8	85270
14.04.29	02.00	220.88	-1.84	6.7	106064
14.04.29	03.00	236.38	6.38	7.5	127457

В табл. 2 наведено дати на квітень 2029 р., всесвітній час, горизонтальні координати (для Києва), видима зоряна величина та геоцентрична відстань у кілометрах.

Проходження Апофіса в квітні 2029 р. буде добре видно з території України. Зокрема для Києва, астероїд зійде над горизонтом 13 квітня близько 20-ї години за Київським часом із блиском приблизно 3^m. Максимальної яскравості він досягне орієнтовно через 4 год (близько опівночі). Зайде Апофіс за горизонт близько 2-ї години 14 квітня з блиском приблизно 3^m. Через 3 години він знову зійде над горизонтом, але вже на світлому небі і з блиском орієнтовно 7^m.

Мінімальне значення геоцентричної відстані дуже близьке до величин майже 20-річної давності (Królikowska et. al., 2009). Отже, елементи орбіти астероїда за цей час не зазнали змін, які не були передбачені в перших розрахунках.

Тому можна зробити висновок, що 2029 р. Апофіс має пройти мимо тих замкових щілин, проходження через які може загрожувати зіткненням астероїда із Землею 2036 р. чи 2037 р. Та попри те відслідковувати орбіту Апофіса до зближення 2029 р. необхідно. Адже навіть невеликі зміни в елементах орбіти можуть змінити умови цього зближення.

Дискусія і висновки

В наступні десять років 15 нумерованих на сьогодні астероїдів з розмірами 100 м і більше будуть наближатися до Землі на відстань менше 0.02 а.о. Три з них може бути видно неозброєним оком.

Розраховані умови зближення Апофіса із Землею є дуже близькими до розрахунків 20-річної давнини. Тому можна стверджувати, що і до зближення 2029 р. орбіта астероїда навряд чи зазнає помітних змін. Це також означає, що 2029 р. Апофіс омине ті замкові щілини, проходження через які може загрожувати зіткненням астероїда із Землею в 2036 р. чи в 2037 р.

Джерела фінансування. Роботу виконано за підтримки гранта МОН України для перспективного розвитку наукового напрямку "Математичні науки та природничі науки" в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка.

Список використаних джерел

- Giorgini, J. D., Benner, L. A. M., Ostro, S. J., Nolan, M. C., & Busch, M. W. (2008). Predicting the earth encounters of (99942) Apophis. *Icarus*, 193, 1–19.
- Kazantsev, A. M. (2002). A simple method for numerical calculations of the evolution of orbits of near-Earth Asteroids. *Solar System Research*, 1(36), 43–49.
- Królikowska, Małgorzata, Sitarski, Grzegorz, Sołtan, & Andrzej M. (2009). How selection and weighting of astrometric observations influence the impact probability. The case of asteroid (99942) Apophis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(4), 1964–1976.
- Sansaturio, M. E., & Arratia, O. (2008). Apophis: the Story Behind the Scenes. *Earth Moon and Planets*, 102, 425–434.

References

- Giorgini, J. D., Benner, L. A. M., Ostro, S. J., Nolan, M. C., & Busch, M. W. (2008). Predicting the earth encounters of (99942) Apophis. *Icarus*, 193, 1–19.
- Kazantsev, A. M. (2002). A simple method for numerical calculations of the evolution of orbits of near-Earth Asteroids. *Solar System Research*, 1(36), 43–49.
- Królikowska, Małgorzata, Sitarski, Grzegorz, Sołtan, & Andrzej M. (2009). How selection and weighting of astrometric observations influence the impact probability. The case of asteroid (99942) Apophis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(4), 1964–1976.
- Sansaturio, M. E., & Arratia, O. (2008). Apophis: the Story Behind the Scenes. *Earth Moon and Planets*, 102, 425–434.

Отримано редакцією журналу / Received: 06.10.25

Прорецензовано / Revised: 12.10.25

Схвалено до друку / Accepted: 11.11.25

Anatoliy KAZANTSEV, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher

ORCID ID: 0009-0008-9700-6500

e-mail: ankaz@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

CLOSE APPROACHES OF THE ASTEROIDS TO THE EARTH IN THE NEXT TEN YEARS

Background. Calculations of precise approaches of asteroids to the Earth are important both for the detection of potentially dangerous ones and for the possibility of more detailed study of them at close distances.

Methods. The main essence of the method is precise calculations of the evolution of asteroid orbits. The orbits themselves are selected from the catalog of the International Minor Planet Center. This catalog is the most complete database of all small bodies and contains the most accurate elements of their orbits.

Results. According to the calculations, 15 asteroids with sizes greater than 100 m were revealed, which in the next ten years will approach the Earth at a geocentric distance of less than 0.02 AU. The conditions for the approach of the asteroid Apophis to the Earth in 2029 will practically not differ from those calculated almost 20 years ago.

Conclusions. In the next ten years, 15 currently numbered asteroids with sizes of 100 m and more will approach the Earth at a distance of less than 0.02 AU. Three of them can be visible with the naked eye. The calculated conditions for the approach of Apophis to the Earth are very close to the calculations of 20 years ago. Therefore, it can be argued that before the approach in 2029, the orbit of the asteroid is unlikely to undergo noticeable changes. This, in turn, will mean that in 2029 Apophis will bypass those "keyholes", the passage through which may threaten the collision of the asteroid with the Earth in 2036 or 2037.

Keywords: asteroids, orbits, approaches, Apophis.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.