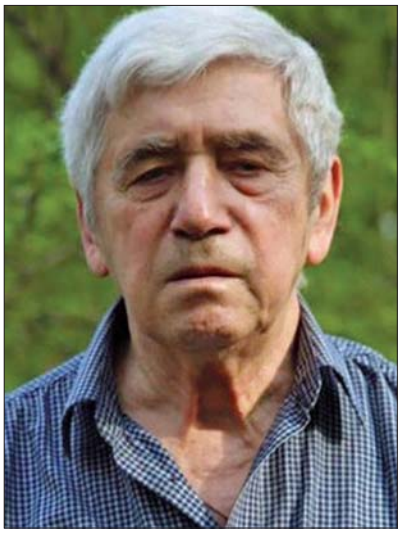
doi: 10.15407/visn2016.03.070



ЖИЛЯЄВ
Борис Юхимович —
доктор фізико-математичних наук, завідувач лабораторії швидкоплинних процесів у зорях Головної астрономічної обсерваторії НАН України

АСТЕРОЇДИ ЯК ФАКТОР ЗАГРОЗИ ЦИВІЛІЗАЦІЇ

У статті стисло розглянуто деякі питання, що стосуються астероїдної небезпеки та можливих наслідків зіткнень астероїдів і комет із Землею, проаналізовано основні засади розрахунку ймовірності небезпечних зіткнень Землі з астероїдами. Показано, що астероїдна небезпека обмежує термін існування цивілізації в межах 50—100 тис. років.

Близько 15 років тому людство усвідомило астероїдну небезпеку. На початку 2000 р. міністр науки Великої Британії лорд Сейнсбурі (David John Sainsbury) оголосив про створення цільової групи з вивчення потенційно небезпечних об'єктів, що зближуються із Землею. Членам цієї групи запропонували внести пропозиції уряду Великої Британії щодо міжнародної кооперації з питань потенційно небезпечних об'єктів, визначити характер небезпеки, можливі ризики і подальші дії. Цільова група під головуванням доктора Гаррі Аткінсона (Harry Atkinson), сера Кріспіна Тікелла (Crispin Tickell) і професора Девіда Вільямса (David Williams) представила свою доповідь генеральному директору Британського національного космічного центру в серпні 2000 р. Ця доповідь і досі залишається найбільш актуальною працею з питань астероїдної небезпеки і характеру можливих наслідків зіткнень астероїдів і комет із Землею.

Що таке астероїдна небезпека

На початок 2000 р. було відомо близько 800 орбіт астероїдів, що зближуються із Землею. На рис. 1 світлим кольором показано орбіти астероїдів, які перетинають орбіту Землі (астероїди типу Apollo і Aten) [1]. Вони є потенційно небезпечними і теоретично рано чи пізно можуть зіткнутися із Землею. Орбіти решти астероїдів (типу Amor) позначено темнішим кольором. Вони наближаються до Землі, але небезпеки для нашої планети не становлять. Отже, з рисунку видно, що Земля буквально оточена морем астероїдів.

Оцінку числа об'єктів різних розмірів, що зближуються із Землею, можна здійснити або прямими спостереженнями за допомогою наземних телескопів, або підраховуючи кількість і вимірюючи розміри кратерів на Місяці та на планетах Сонячної системи і їх супутниках. Комети можуть збільшити число небезпечних об'єктів на кілька відсотків. За даними на початок 2000 р. можна було говорити приблизно про 1000 астероїдів діаметром понад 1 км, що зближуються із Землею, і близько 100 000 — з діаметром більш як 100 м. Ці цифри досить невизначені і могли змінюватися в більший чи менший бік.

Серед комет найнебезпечнішими вважають довгоперіодичні комети. Їх появу найчастіше неможливо передбачити, а орбіту не можна обчислити на великому проміжку часу. Комета може завдати набагато більше шкоди, ніж астероїд такої самої маси, тому що комети в середньому мають швидкість приблизно вдвічі більшу, ніж швидкість астероїдів, а їхні енергія і руйнівна сила зростають як квадрат швидкості.

Наведені цифри дають картину в цілому, але нас більше цікавлять конкретні події, пов'язані з конкретними астероїдами. Слід уточнити саме поняття потенційно небезпечного об'єкта. Річ у тім, що орбіту астероїда не можна розрахувати з високою точністю на великому інтервалі часу. Точний розрахунок неможливий через збурення, викликані планетами Сонячної системи і негравітаційними силами, що діють на астероїд. Наприклад, на освітлюваний Сонцем астероїд, що обертається, діють сили, які досить складно врахувати. Вони пов'язані з випромінюванням квантів його нерівномірно нагрітою поверхнею. Ці сили незначні за величиною, але здатні відводити астероїд з розрахункової орбіти. Це так званий ефект Ярковського. Саме цей ефект є основним джерелом невизначеностей при розрахунках імовірностей зіткнення небезпечних астероїдів із Землею. Однак про це трохи пізніше, коли будемо говорити про ймовірність зіткнення об'єкта із Землею.

У 1973 р. Артур Кларк у фантастичному романі «Побачення з Рамою» вигадав термін

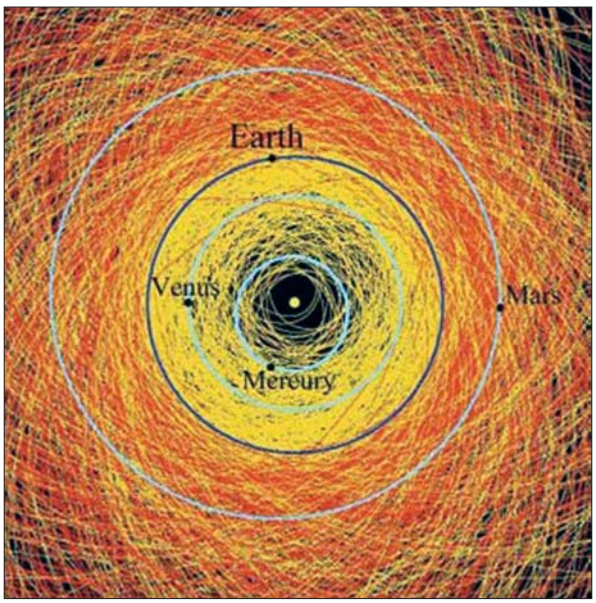


Рис. 1. Орбіти близько 800 навколоземних астероїдів, відомих на початок 2000 р. Орбіти астероїдів, які перетинають орбіту Землі і є потенційно небезпечними, позначено жовтим (світлим) кольором. Орбіти астероїдів, які наближаються до Землі, але небезпеки не становлять, позначено червоним (темним) кольором [1]

Космічна Варта (The Spaceguard). Нині у нашому реальному світі служби Космічної Варти для пошуку, супроводження та дослідження потенційно небезпечних об'єктів, що зближуються із Землею, створено в США, Канаді, Австралії, Італії, Великій Британії. Започатковано європейський проект EUNEASO Project для пошуку, супроводження та астрономічних спостережень потенційно небезпечних об'єктів, у якому беруть участь обсерваторії Німеччини, Франції, Швеції, Італії, Чехії та астрономічна обсерваторія Харківського університету.

Зараз десятки телескопів ведуть безперервний моніторинг неба в пошуках нових потенційно небезпечних об'єктів. Недавно запущено європейську космічну обсерваторію GAIA, здатну стежити за приблизно 250 000 астероїдів аж до 20-ї зоряної величини. Однак не буде великим перебільшенням сказати, що сьогодні ми можемо виявляти, оцінювати і передбачати реально небезпечні об'єкти десь лише в 50% випадків.

Картини глобальних катастроф

Основними ефектами впливу об'єктів при зіткненнях із Землею є вибухові хвилі, океанічні цунамі, інжекції речовини в атмосферу, хімічні реакції в атмосфері під впливом високих температур, а також інспіровані зіткненнями активність вулканів і землетруси. Величина і потужність зазначених факторів сильно залежать від розміру потенційно небезпечного об'єкта.

У процесі зіткнення внаслідок високих температур в ударній хвилі починаються хімічні зміни в атмосфері. Може розпочатися горіння азоту в кисні з утворенням оксидів азоту, які стають джерелом кислотних дощів і руйнують

Рис. 2. Кратер Дедал на зворотному боці Місяця. Знімок з борту космічного корабля «Аполлон-11»

Рис. 3. Космічний знімок подвійного ударного кратера (Квебек, Канада)

озоновий шар, що захищає Землю від сонячного ультрафіолетового випромінювання.

Зіткнення спричинює значні зміни в атмосфері. У ній з'являється величезна кількість розплавлених часточок ґрунту, здатних запалити будь-який горючий матеріал, що призводить до масштабних пожеж. Пожежі генерують багато сажі і отруюють повітря піротоксинами. Часточки можуть залишатися в повітрі протягом кількох місяців або навіть кількох років. Значна кількість таких часточок ослаблює потік сонячного світла. Підвищена кількість води, що надходить в атмосферу з океанів, призведе до утворення кристалів льоду на часточках. У результаті настане глобальне охолодження поверхні Землі — так званий феномен «ядерної зими».

Ми й тепер можемо спостерігати сліди минулих катастроф на Землі, планетах і супутниках планет Сонячної системи. Наприклад, 80-кілометровий кратер на зворотному боці Місяця, зафіксований у 1969 р. 11-ю місією Аполло (рис. 2), і озера Клірвотер (Clearwater Lakes) у Канаді діаметром 22 і 32 км (рис. 3) – мовчазні свідки катастроф, спричинених зіткненнями з астероїдами. Канадські озера утворилися внаслідок зіткнення подвійного астероїда із Землею 260 млн років тому. Теоретичні розрахунки показують, що 30-кілометровий кратер — результат зіткнення з астероїдом розміром близько 1,7 км. Це зіткнення спричинило руйнування ділянки суходолу розміром з Францію чи Японію, глобальну зміну клімату, багатолітню «ядерну зиму», руйнування озонового шару і знищення багатьох форм життя на планеті.

На Землі тільки в Тихоокеанському вогняному кільці налічується 526 вулканів. Понад 300 з них вивергалися в історичні часи. Грандіозність вулканічних явищ вражає. Виверження вулкана Кракатау в Зондській протоці в Індонезії в серпні 1883 р. супроводжувалося викидами шматків розпеченої лави на висоту до 50 км. Віднесений вітром вулканічний попіл вкрив 2% території земної кулі. Найпотужніше виверження вулкана Тамбора на о. Сумбава в Індонезії в квітні 1815 р. викинуло в повітря

близько 100 км^3 попелу. Енергія виверження Тамбори дорівнювала 20 тис. мегатонн у тротиловому еквіваленті.

Поодинокі виверження вулканів не становлять серйозної небезпеки для біосфери Землі. Однак важко навіть уявити, що станеться, якщо одночасно прокинуться сотні вулканів. Зіткнення Землі з великим астероїдом може стати спусковим механізмом, який пробудить активність вулканів. Одночасне виверження десятка таких вулканів, як Кракатау, здатне завдати непоправної шкоди біосфері Землі.

Зіткнення Землі з великим астероїдом може також спричинити масові землетруси. Унаслідок руху тектонічних плит у надрах Землі накопичуються пружні напруження. Коли вони досягають межі міцності гірських порід, виникає розрив. Накопичена енергія вивільняється, пружні хвилі досягають поверхні Землі, призводячи до великих руйнувань.

Отже, зіткнення Землі з великим астероїдом здатне спричинити глобальну катастрофу, стихійні лиха виникатимуть по всій планеті, завдаючи нищівного удару всьому живому. Масштаби цієї катастрофи залежать від розміру потенційно небезпечного об'єкта. Астероїд діаметром навіть у кілька кілометрів може призвести до знищення всіх розвинених форм життя на планеті, повертаючи Землю до доісторичних часів, коли на ній тільки почало зароджуватися життя.

Розрахунок імовірностей зіткнень

Цей розділ ґрунтується на даних проекту NASA Near Earth Objects Program, що містять відомості про 540 небезпечних астероїдів. Продемонструємо розрахунок імовірності небезпечних зіткнень Землі з астероїдами, що можуть призвести до глобальних катастроф і становити загрозу існуванню багатьох форм життя на нашій планеті. Показано, що астероїдна небезпека обмежує термін існування цивілізацій у межах 50—100 тис. років.

Дані проекту Near Earth Objects Program містять відомості про ймовірність зіткнення із Землею небезпечних об'єктів, їхні розміри, моменти майбутніх зближень протягом найближчих 100 років [2].

Виконати точний розрахунок орбіти астероїда на великому проміжку часу неможливо з двох причин. По-перше, астероїд рухається не лише під впливом гравітації Сонця, на нього діють також гравітаційні сили планет Сонячної системи. Це значно ускладнює завдання розрахунку орбіти, необхідну точність розрахунку на інтервалі, скажімо, 1000 років гарантувати не можна. По-друге, астероїд нагрівається Сонцем з одного боку. Нагріта частина астероїда випромінює більше квантів, ніж тильна, не нагріта Сонцем. Внаслідок реакції власного випромінювання астероїда (згаданий вище ефект Ярковського) виникає незначна сила, яку тим не менш потрібно враховувати при розрахунку орбіти. Ця сила залежить від форми астероїда, природи його поверхні. Найчастіше ці фактори не відомі і для різних астероїдів є різними. Звідси випливає, що обчислення точних орбіт потенційно небезпечних астероїдів, а отже, і можливих зіткнень з ними, виявляється неможливим.

Для обчислення ймовірності зіткнення небезпечних астероїдів із Землею використовують техніку так званих *віртуальних астероїдів*, що моделюють збурення планет на номінальну орбіту астероїда. Орбіти рою віртуальних астероїдів, який містить 100 тис. і більше об'єктів, інтегрують чисельно за часом аж до зближення із Землею. Імовірність зіткнення для реального астероїда визначається як частка віртуальних астероїдів, що зазнали зіткнення із Землею, до загальної кількості віртуальних астероїдів.

Розрахунок імовірності здійснення хоча б одного зіткнення за наявності групи незалежних астероїдів є складною математичною задачею [3]. Ми наведемо лише результати таких розрахунків. Однак на прикладі одного астероїда продемонструємо сутність розрахунку.

Припустимо, що небезпечний астероїд з імовірністю зіткнення $5\cdot10^{-6}$ наближається до Землі кожні два роки. Легко зрозуміти, що має статися $1/5\cdot10^{-6} = 2\cdot10^5$, тобто 200 тис. зближень, щоб відбулося одне зіткнення. Помноживши цю величину на період зближення —

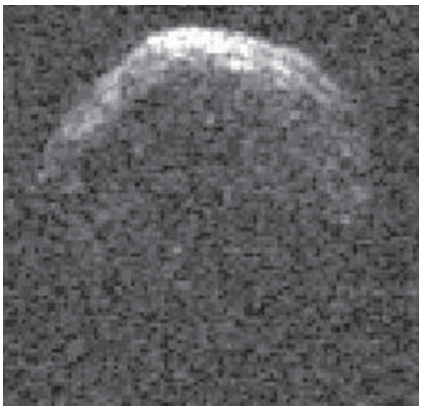


Рис. 4. Радарне зображення астероїда (29075) 1950 DA, зроблене на радіотелескопі в Arecibo Observatory 4 березня 2001 р.

2 роки, отримаємо 400 тис. років. Це оцінка часу очікування зіткнення.

Серед 540 небезпечних астероїдів 17 — розміром понад 300 м; 13 — більш як 400 м; 9 — понад 500 м; 2 — більше ніж 1 км. У групі астероїдів розміром понад 500 м імовірність зіткнення із Землею коливається від $1\cdot10^{-10}$ до $1\cdot10^{-6}$. Астероїди розміром понад 400 м при зіткненні із Землею здатні спричинити катастрофу планетарного масштабу. Енергія такого зіткнення еквівалентна енергії вибуху 2000 мегатонн тротилу.

Для групи астероїдів розміром більш як 400 м (13 об'єктів) з календарними датами потенційного зіткнення від 2018 до 2199 р. імовірність того, що відбудеться хоча б одне зіткнення, дорівнює $3{,}3\cdot10^{-3}$. Ця ймовірність стосується часового інтервалу в 181 рік. Звідси можна дійти висновку, що інтервал часу для реалізації реального зіткнення становить $181/3{,}3\cdot10^{-3} = 55$ тис. років.

Для групи астероїдів розміром понад 500 м (9 об'єктів) імовірність одного зіткнення дорівнює $1{,}15\cdot10^{-6}$ на часовому інтервалі 98 років. Інтервал часу для реального зіткнення становить 85 млн років.

Висновки

Як зазначають автори проекту Near Earth Objects Program [2], довготривала екстраполяція орбіт і невизначеності, зумовлені планетними збуреннями, можуть впливати на точність визначення ймовірностей зіткнення. Дослідники підкреслюють, що вони оцінюють ці ймовірності з точністю до порядку величин. Можна також вважати, що інтервали часу для реалізації реального зіткнення, наведені вище, теж визначаються з точністю до порядку величин. Однак у будь-якому разі отримані інтервали часу для реалізації реальних зіткнень небезпечних астероїдів із Землею можна розглядати як час життя цивілізацій, відведений для нас природою.

Найнебезпечніший для Землі астероїд (29075) 1950 DA, який поки що не має власного імені, належить до сімейства Apollo (рис. 4).

Він перетинає орбіту Землі раз на 2,21 року. Небезпечне зближення прогнозується в 2880 р. Розрахована ймовірність зіткнення становить $5\cdot10^{-5}$. Формально зіткнення може реалізуватися протягом 17 млн років. Однак, як зазначалося вище, одиночна оцінка ймовірності зіткнення визначається з точністю до порядку. Діаметр астероїда оцінюється в 1,3 км, маса — у 2 млрд тонн, швидкість зіткнення — 18 км/с, енергія — 75 тис. мегатонн у тротиловому еквіваленті. Наслідки такого зіткнення будуть фатальними для цивілізації через глобальні руйнування, глибокі й довгострокові зміни клімату на всій планеті.

Навіть дуже грубі оцінки, наведені тут, дозволяють зробити висновок, що глобальні катастрофи, пов'язані з астероїдами, відбувалися на Землі не один раз, можливо, десятки разів за всю історію існування нашої планети. Проте через мільйони років життя на Землі поновлювалося. І ніщо не перешкоджало появі нових паростків цивілізації.

Постскриптум

Велике мовчання, або парадокс Фермі, є каменем спотикання в проблемі позаземних цивілізацій. Парадокс полягає в тому, що ми не спостерігаємо технологічних ознак існування позаземних цивілізацій, потенційну кількість яких лише в нашій Галактиці можна оцінити від кількох мільярдів до десятків мільярдів. Історичний

календар енциклопедії *Britannica* оцінює вік земної цивілізації в межах 70–100 тис. років. Це лише дві десятитисячні частки віку Землі з моменту, коли на ній зародилося біологічне життя. Однією з причин, що пояснюють парадокс Фермі у Всесвіті, називають обмежений термін існування цивілізацій, що не дозволяє їм виходити на рівень позаземних контактів.

У цій роботі ми показали, що астероїдна небезпека може обмежувати термін існування цивілізації в межах 50—100 тис. років. Враховуючи універсальний характер процесів утворення планетних систем, можна припустити, що обмежений час життя цивілізацій, продиктований астероїдною небезпекою, є універсальним законом Всесвіту. Мабуть, великі закони природи відводять цивілізаціям таку саму долю, як і людським життям: народження, розквіт, згасання і зникнення. Ніщо не вічне під Місяцем...

REFERENCES
[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Report of the Task Force on Potentially Hazardous Near Earth Objects. September 2000. http://spaceguardcentre.com/wp-content/uploads/2014/04/full_report.pdf.
2. Near Earth Objects Program. http://neo.jpl.nasa.gov/risk.
3. Handbook on probability calculations. Moscow: Voenizdat, 1970.
[Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воениздат, 1970].

Стаття надійшла 19.11.2015.

Б.Е. Жиляев

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины (Киев)

АСТЕРОИДЫ КАК ФАКТОР УГРОЗЫ ЦИВИЛИЗАЦИИ

В статье кратко рассмотрены некоторые вопросы, касающиеся астероидной опасности и возможных последствий столкновений астероидов и комет с Землей, проанализированы основные принципы расчета вероятности опасных столкновений Земли с астероидами. Показано, что астероидная опасность ограничивает срок существования цивилизации в пределах 50—100 тыс. лет.

B.E. Zhilyaev

Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

ASTEROIDS AS A FACTOR OF THREAT TO CIVILIZATION

The article briefly discusses some issues relating to the asteroid hazard and possible consequences of asteroid and comet collisions with Earth, analyzes the basic principles for calculating the probability of asteroid collisions with Earth. It is shown that the asteroid hazard limits the period of existence of civilizations in the range 50—100 kyr.