

УДК 523.4+523.51+521.1+523.442

Метеорно-астероїдна та доплив космічної речовини на Землю небезпека

В. Г. Кручиненко¹, Ю. І. Волощук², Б. Л. Кащеєв²,
А. М. Казанцев¹, Д. Ф. Лупішко³, Я. С. Яцків⁴

¹ Астрономічна обсерваторія Київського університету ім. Тараса Шевченка

² Технічний університет радіоелектроніки, Харків

³ Астрономічна обсерваторія Харківського державного університету

⁴ Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Надійшла до редакції 29.12.98

На основі сучасних результатів дослідження малих тіл Сонячної системи розглянута проблема метеорно-астероїдної небезпеки. З використанням даних одного з найбільших банків метеорних даних та результатів розрахунків еволюції орбіт астероїдів сформульовані нові підходи до пошуку космічних тіл, що становлять небезпеку для нашої планети. Розглянуто питання руйнування метеороїдів різних мас в атмосфері і на поверхні Землі та запропоновано критерій поділу метеоритів на ударні та вибухові. Проведено аналіз даних про доплив космічних тіл на Землю в широкому спектрі мас. Наведені результати розрахунків ймовірностей зіткнень космічних апаратів з метеороїдними частинками.

*I велика зоря спала з неба,
палаючи, як смолоскип...
(Біблійне пророцтво
з Откровення св. Івана Богослова)*

Загальновідомо, що в Сонячній системі крім Сонця, дев'яти планет та їх супутників є так звані малі тіла. До них належать малі планети або астероїди, комети, метеорна речовина і міжпланетний пил. Із метеорної речовини складаються метеорні рой, частинки яких мають приблизно однакові орбіти і спільне походження, — значна їх частина є продуктами дезінтеграції комет. Інші частинки міжпланетної метеорної речовини, кожна з яких має свою орбіту, називають спорадичними. Комплекс малих космічних тіл різних розмірів — найбільш динамічна складова Сонячної системи. Ця складова неперервно поповнюється новими тілами і приблизно стільки ж їх втрачає. Основними джерелами

появи метеорних тіл та міжпланетного пилу є дезінтерація ядер комет при наближенні їх до Сонця та руйнування астероїдів при зіткненнях між собою та з іншими тілами. Частинки мікронних розмірів «вимітаються» сонячним вітром та сонячною радіацією в міжзоряний простір, а більші, для яких гравітація Сонця переважає над тиском світла, згідно з ефектом Пойнтінга—Робертсона [40], гальмуються в полі сонячної радіації і наближаються до Сонця. В області *F*-корони Сонця вони нагріваються, сублімують і досягають (на відстані 2-3 радіусів Сонця) критичного (мікронного) розміру і також виштовхуються за межі Сонячної системи.

При зіткненні з атмосферами планет тіла різних розмірів і мас породжують явища метеорів і болідів. (Болід — це метеор, блиск якого при спостереженні з Землі перевищує блиск Венери). Не породжують метеорів лише ті частинки, які загальмовуються в

атмосфері планети раніше, ніж їхня поверхня досягає необхідної для інтенсивного випаровування температури. Ці частинки, які у вигляді аерозолів осідають на поверхню Землі, отримали назву мікрометеоритів Уїппла [42]. В земній атмосфері в залежності від швидкості входу (11—72 км/с) вони мають маси 10^{-5} — 10^{-13} г відповідно. Різні швидкості, з якими космічні тіла (метеорні, астероїдні, кометні) входять в різні атмосфери планет, створюють широкий спектр характеристик породжуваних явищ. Мінімальна швидкість входження тіла в атмосферу — це параболічна (друга космічна) швидкість $V_{\text{п}}$ для даної планети. Максимальну можна визначити (якщо тіло належить Сонячній системі) за формулою

$$V_{\max} = [V_{\text{п}}^2 + (1 + \sqrt{2})^2 V_{\text{ОРБ}}^2]^{1/2},$$

де $V_{\text{ОРБ}}$ — середня швидкість планети на орбіті. З наведеної залежності випливає, що кожна планета має свій «коридор» швидкостей, з якими космічні тіла входять в її атмосферу. Для планет-гігантов Юпітера і Сатурна, наприклад, ці коридори значно вужчі (59.4—67.3 і 35.5—42.2 км/с), ніж для Землі, Марса і Венери (11.2—72.8, 5.0—58.6, 10.3—85.4 км/с відповідно).

В земну атмосферу щодоби влітає понад 20 млн метеорних часток, маси яких не менші 0.01 г. Диференційний розподіл тіл за масами в Сонячній системі (в широкому діапазоні мас від 10^{-15} до 10^{22} г) можна наблизено представити степеневою залежністю: $f(M) \propto M^{-s}$. Параметр розподілу s для невеликих інтервалів мас становить 1.5—2.5. Якщо $s = 2.0$, то сумарна маса тіл в рівних логарифмічних ділянках мас одна і та ж.

АСТЕРОЇДНА НЕБЕЗПЕКА. СУТЬ ПРОБЛЕМИ ТА СТАН ЇЇ ВИВЧЕННЯ

В наш час поряд з іншими проблемами виживання людства серйозно заявила про себе проблема метеорно-астероїдно-кометної небезпеки. Накопичення та осмислення нових спостережних даних та теоретичних оцінок про малі тіла Сонячної системи, виявлення слідів значної кількості космічних катастроф на поверхнях планет, супутників планет та астероїдів, астроблеми (зоряні рани) на земній поверхні, нові дані про катастрофічні зіткнення тіл в Сонячній системі зробили суттєвий поступ у сприйнятті науковими колами та суспільством тієї реальної небезпеки, яку являють собою зіткнення великих космічних тіл з Землею. Стало зрозумілим, що падіння великих тіл на Землю відігравали значну роль у розвитку життя на Землі у минулого

му і можуть мати вирішальний вплив у майбутньому. Найважливіша роль у цьому процесі належить популяції астероїдів, що можуть наблизятися до Землі (АНЗ).

Проблемою астероїдної небезпеки зараз займаються окремі групи фахівців в різних країнах. Починаючи з 1981 р. на дану тему відбулося більше десяти міжнародних нарад та симпозіумів; згідно з директивою Конгресу США (1994 р.) питаннями астероїдної небезпеки займається НАСА спільно з Міністерством оборони США; проблема обговорювалась в Комітеті з науки та технології Ради Європи (1995 р.); Парламентська асамблея Ради Європи одностайно схвалила Резолюцію 1080 «Про виявлення астероїдів та комет, потенційно небезпечних для людства» (1996 р.) та ін.

До нинішнього часу (на 1.07.1998) виявлено 529 астероїдів з перигелійною відстанню $q \leq 1.3$ астрономічної одиниці (а. о.), які належать до груп Атона (30 астероїдів), Аполлона (254) і Амура (245). Це так звані AAA-астероїди, фізичні властивості яких майже не відрізняються від характеристик астероїдів відповідних розмірів головного поясу [27]. Вони мають в основному такий же мінералогічний склад, такі ж оптичні властивості поверхонь, форму та періоди обертання. Основні відмінності — це типи орбіт і відносно малі розміри. Найбільший з них — астероїд 1036 Ганімед, що має діаметр біля 40 км і належить до групи Амура. Серед астероїдів, що можуть наблизятися до Сонця близче, ніж Земля (групи Атона і Аполлона, $q < 1.017$ а. о.), найбільшим є 1866 Сизиф, діаметр якого дорівнює 8 км.

За останні роки зусилля фахівців все більше направляються на дослідження саме АНЗ. З точки зору фундаментальної науки такі питання, як походження АНЗ, механізми їхнього переходу на біляземні орбіти, час життя, зв'язок з іншими малими тілами Сонячної системи та ін. здаються дуже важливими для вирішення основної проблеми — проблеми походження та еволюції Сонячної системи.

З іншого боку, вивчення цих об'єктів набуває також дуже важливого прикладного значення. АНЗ все частіше розглядаються як потенційні джерела металів та іншої мінеральної сировини (Fe, Ni, Mg, Al, Si, H₂O, N, C, O та ін.) в біляземному космічному просторі. Значна частина АНЗ містить леткі речовини (водень, азот, вуглець) у 100 разіввищих концентраціях, ніж місячна речовина. Як показують дані радарних спостережень [36], серед АНЗ є чисто металеві об'єкти. Непрямим підтвердженням цього є, наприклад, Сіхоте-Алінський метеорит (94 % Fe і 6 % Ni), що впав в Усу-

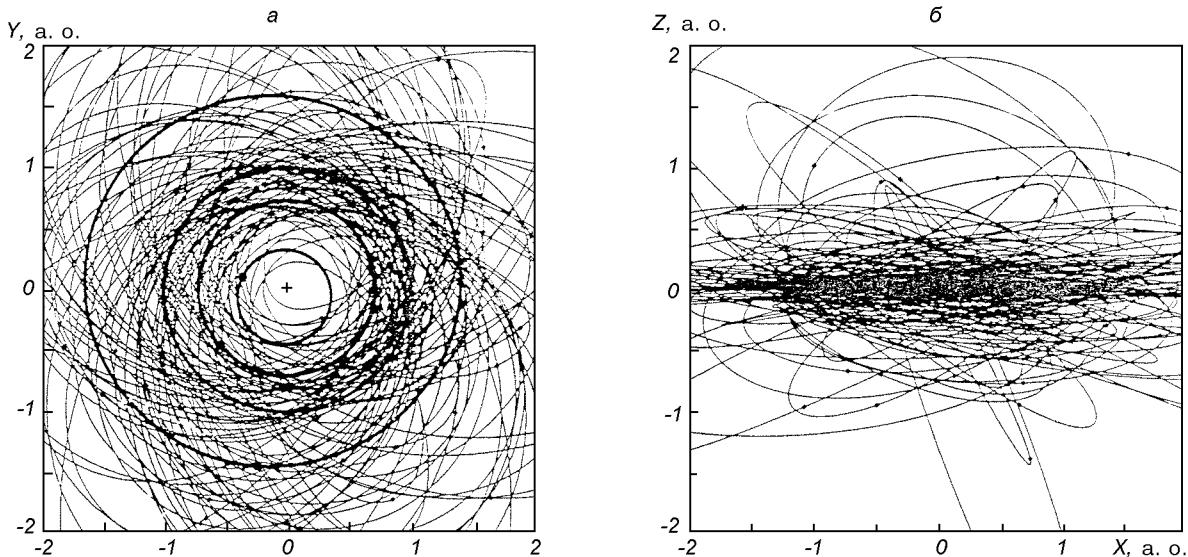


Рис. 1. Проекції 115 орбіт АНЗ на площину екліптики (а) та на площину, перпендикулярну до неї (б). Жирними лініями на рис. 1, а показані орбіти Меркурія, Венери, Землі та Марса, хрестик — положення Сонця

рійській тайзі у 1947 р. Загальна маса його за оцінками фахівців склала біля 100 т (зібрано майже 30 т). Речовина поверхонь АНЗ може бути використана також для термоядерної енергетики (добування термоядерного пального гелію-3). В цьому плані приблизно п'ята частина АНЗ є вигіднішими, ніж Місяць. Існують проекти використання корисних копалин АНЗ, і можливо, такі роботи розпочнуться уже на початку ХХІ століття.

І нарешті, різке зростання в останній час інтересу до вивчення АНЗ пов'язане з проблемою астероїдної небезпеки. Згідно з наявними даними існує біля 2100 АНЗ з діаметрами D більше 1 км і біля 320 тисяч з діаметрами більше 100 м. Зіткнення з Землею кожного з них — це реальна небезпека для людства, глобальна чи регіональна. На рис. 1 показані орбіти лише 115 АНЗ з перигелійними відстанями $q < 1.0$ а. о. разом з орбітами Меркурія, Венери, Землі та Марса. До нинішнього часу виявлені всі об'єкти з $D \geq 12$ км серед низькоалбідних астероїдів (С-тип) і з $D \geq 6$ км серед середньоалбідних АНЗ (S, M-типи). В той же час, нам відомі орбіти лише близько 7 % АНЗ з $D \geq 1$ км і всього 0.1—0.2 % орбіт АНЗ з $D \geq 100$ м.

Імовірність зіткнення астероїда з Землею дуже мала, але внаслідок великого числа цих об'єктів частота зіткнень досягає відчутної величини. Вона складає приблизно одне зіткнення за мільйон років для астероїдів діаметром 1—2 км і одне за сто років

для астероїдів діаметром 30 м. Можна отримати аналогічні оцінки і для комет. Але підрахунки показують, що потік коротко- і довгоперіодичних комет (разом) складає не більше 10 % від АНЗ [14].

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ КОСМІЧНИХ ТІЛ РІЗНИХ РОЗМІРІВ (МАС) В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ

Інтенсивність руйнування метеороїда значною мірою залежить від швидкості входження в атмосферу та від його структури і густини. Розглянемо випадок середньої (біля 30 км/с) початкової швидкості. На підставі даних спостережень та фізичної теорії руйнування тіл в атмосфері Землі [2, 5, 9, 17] можна зробити такі висновки.

Метеорні частинки, що мають маси не більше 1 г, взаємодіють з атмосферою у вільно-молекулярному режимі і повністю руйнуються на висотах від 110 до 80 км над поверхнею Землі, породжуючи явища слабких та яскравих метеорів, які реєструють в значній кількості оптичними та радіолокаційними засобами спостережень. Більш масивні метеороїди (десятки та сотні грамів) породжують явища болідів і досягають висот 40—50 км. Рух тіла в атмосфері, маса якого перевищує 1 кг, відбувається в режимі суцільного середовища. Його супроводжує ударна хвиля. Деяка частина таких тіл досягає малих висот над земною поверхнею

(5—15 км), де в околі висоти максимального гальмування H_* відбувається тепловий вибух і спалах блиску. На відрізку висот 1 км в околі H_* тіло втрачає на гальмування стільки енергії, що її достатньо для випаровування всієї маси.

Визначимо заатмосферні радіуси R_0 тіл, висоти максимального гальмування яких знаходяться на поверхні Землі. Для цього скористаємося даними робіт [9, 10]:

$$R_0 = 1.24 \Gamma A_0 H^* \exp\{\sigma(1 - \mu)V_0^2/2 - \text{th}[0.175\sigma(1 - \mu)V_0^2]\} \times \\ \times \{1 - \text{th}[0.175\sigma(1 - \mu)V_0^2]\} \rho(H_*) / \delta \cos Z_R, \quad (1)$$

де $\Gamma = 0.5$ — коефіцієнт гальмування; $A_0 = 1.65$, $\mu = 0.4$ — коефіцієнт форми та параметр форми тіла; $H^* = 7.5 \cdot 10^5$ см — висота однорідної атмосфери (шкала висот); $\sigma = \Lambda/2\Gamma Q = 1.25 \cdot 10^{-12}$ см²/с² — коефіцієнт аблляції, $\Lambda = 0.025$ — коефіцієнт енергопередачі, $Q = 2 \cdot 10^6$ Дж/кг — питома енергія руйнування; V_0 — початкова швидкість (швидкість входження в атмосферу); $\rho(H_*)$ — густини атмосфери на висоті максимального гальмування; δ — густина тіла; $Z_R = 48^\circ$ — зенітна відстань радіанта. Замість величини $\rho(H_*)$ підставляємо значення густини атмосфери на нульовій висоті. В такій формі залежність (1) ми розглядаємо як критерій для визначення мінімального розміру вибухових метеоритів. Наводимо також середні значення параметрів, які використані при проведенні обчислень. Результати обчислень за формулою (1) показані в табл. 1. Величини R_0 для кометних тіл з густиною 1 г/см³ наведені в дужках, тому що руйнування таких тіл потребує додаткових досліджень.

Для тіл, що мають розміри, дещо менші R_0 , характерним сценарієм є практично повна (в залежності від густини тіла та його структури) фраг-

Таблиця 1. Значення заатмосферного радіуса R_0 тіла, що досягає поверхні Землі, в залежності від швидкості його входу в атмосферу та від густини тіла

V_0 , км/с	δ , г/см ³	R_0 , м
10	1.0	(18)
	3.0	6.1
	7.8	2.4
30	1.0	(36.5)
	3.0	12.2
	7.8	4.7
60	1.0	(700)
	3.0	230
	7.8	90

ментація в околі висоти H_* , тепловий вибух, спричинений короткочасним випаровуванням великої кількості дрібних фрагментів, і, як наслідок, утворення вибухової хвилі та світлового спалаху (приблизно рівного блиску Сонця), а також, якщо це тіло кам'яне або залізне (не кометної природи), — падіння уламків на поверхню Землі.

Для перевірки залежності (1) ми визначили висоти максимального гальмування двох відомих феноменів: Тунгуського та Сіхоте-Алінського. Для Тунгуського кометного тіла прийняли такі дані: $R_0 = 30$ м, $\delta = 1$ г/см³, ($M_0 = 10^{11}$ г), $Z_R = 82^\circ$, $V_0 = 45$ км/с. Значення інших параметрів ті ж, що використовувалися при обрахуванні табл. 1. Виявилося, що швидкість на висоті максимального гальмування $V_* = 16.3$ км/с, висота $H_* = 10—12$ км. Для Сіхоте-Алінського залізного метеорида використали дані: $M_0 = 100$ т, $\delta = 7.8$ г/см³, ($R_0 \approx 145$ см), $Z_R = 45^\circ$, $V_0 = 15$ км/с. Результат обчислень: $V_* = 6.2$ км/с, $H_* = 9.2$ км. Отримані значення висот максимального гальмування в обох випадках близькі до відомих оцінок висот вибуху цих космічних тіл. Тому вважатимемо, що формула (1) може бути використана для подібних розрахунків.

На Землю випадають метеорити, тобто залишки тіл від їх руйнування в атмосфері, які при вході в атмосферу, як правило, мали швидкості, що не перевищували 20—22 км/с. Для більших початкових швидкостей імовірність падіння метеорита експоненціально зменшується — це випливає з табл. 1 та з розподілу тіл по масі. Такі тіла, згідно з нашою класифікацією, мають початкові розміри, не більші R_0 . Кожний рік на Землю падає біля 500 метеоритів від 1 кг і більше, а знаходять тільки 10—20 метеоритів. Колекції нараховують близько 700 метеоритів, падіння яких спостерігали, і близько 900 метеоритів, падіння яких не спостерігалося. Кам'яні метеорити складають близько 92 %, залізні — 6 %, залізо-кам'яні — 2 %. Серед кам'яних метеоритів є вуглисти хондрити, які представляють значний інтерес для космогонії Сонячної системи, оскільки мають ряд особливостей: вони збагачені вуглецем, який входить в органічні сполуки, мають зв'язану воду, сірку та ряд інших мінералів. Є аргументи на користь того, що вуглисти хондрити за своїм складом найбільш близькі до первинної речовини Сонячної системи і, можливо, є її залишками.

При падінні на поверхню планети метеорити можуть утворювати ударні або вибухові кратери. Якщо швидкість падіння менша 4—5 км/с, то утворений кратер буде ударним, невеликого роз-

міру і основна маса метеорита (монолітного чи зруйнованого) залишиться у поверхневому шарі. Очевидно, що такими ударними метеоритами можуть бути лише ті, початкові розміри яких не перевищують R_0 . Серед відомих великих метеоритів до цієї категорії можна віднести залізний метеорит Гоба (вагою 60 т), знайдений у 1920 р. в Південно-Західній Африці. Якщо метеорит при падінні має швидкість 5 км/с і більше, то запасу його кінетичної енергії достатньо для зруйнування структури твердого тіла і утворення зі значної кількості речовини самого метеорита та ґрунту дуже стиснутого високотемпературного газу. Об'єм речовини, що перетворюється в газ, в десятки та сотні разів більший від розмірів метеорита. Утворена таким чином вибухова хвиля призводить до значних руйнувань, великомасштабних збурень атмосфери та її значного забруднення. До вибухових ми відносимо відомий Арізонський кратер (Північна Америка, час падіння за різними оцінками від 5 до 50 тис. років тому; кратер діаметром 1,2 км і глибиною 175 м; знайдено тисячі дрібних фрагментів). Він утворений залізною брилою, що мала, як випливає із наших подальших розрахунків, розмір не менше 100 м і швидкість при падінні не менше 11 км/с.

На тіла, що мають розміри більші від граничних R_0 (не кометної природи), вплив атмосфери Землі мінімальний, тому вони досягають поверхні нашої планети практично без втрати швидкості та маси і без фрагментації. Такі тіла утворюють вибухові кратери. Основна енергія виділяється при ударі об тверду або рідку поверхню. Діаметр кратера перевищус розмір тіла в десятки раз, а площа зони ураження S_y (в гектарах) може бути оцінена за формулою [22]: $S_y = 10^5 \cdot E^{2/3}$, де E — кінетична енергія в Мт (1 Мт ТНТ = $4.2 \cdot 10^{15}$ Дж). При падінні, наприклад, 250-м тіла ($E = 10^3$ Мт), що трапляється приблизно один раз за двадцять тисяч років, $S_y = 10$ млн га.

МОЖЛИВІ НАСЛІДКИ. СТУПІНЬ РИЗИКУ

Мінімальний розмір астероїда, зіткнення з яким при швидкості 20 км/с може викликати на Землі глобальні катастрофічні зміни клімату, фауни і флори, становить 1—2 км. Таке зіткнення приведе до вибуху, тротиловий еквівалент якого становить $7 \cdot 10^5$ Мт (35 млн «Хіросім»). Викид речовини з кратера приблизно в 1000 разів перевищить об'єм тіла, що може викликати ефект «ядерної зими»: підняті в атмосферу пил і сажа поглинуть сонячне випромінювання, в результаті чого різко зменшиться

температура на поверхні Землі, відбудеться глобальні зміни в екології, що може привести до загибелі значної частини населення Землі протягом декількох місяців або років. Глобальна катастрофа особливо страшна, тому що жодна нація або уряд не будуть в змозі надати допомогу іншим країнам, оскільки лихоманка охопить всю планету. Людська цивілізація в тому вигляді, якого вона досягла за декілька тисяч років свого розвитку, може припинити своє існування.

Нижче наведені оцінки ступеня ризику для середнього громадянина загинути протягом життя від різноманітних причин [22].

Причина смерті	Ступінь ризику
Автокатастрофа	1/100
Вбивство	1/300
Пожежа	1/800
Ураження електроствором	1/5000
Авіакатастрофа	1/20 000
Зіткнення з астероїдом або кометою	1/25 000
Повінь	1/30 000
Торнадо	1/60 000
Отруйний укус	1/100 000
Ботулізм	1/300 000

Параadoxальний на перший погляд результат — ступінь ризику загинути в космічній катастрофі виявився приблизно таким же, як і у випадку авіаційної катастрофи або повені. Однак тут все більш-менш правильно, оскільки ступінь ризику — це добуток імовірності події на кількість втрат (при зіткненні з астероїдом можуть бути не десятки або сотні жертв, а мільйони).

ПАДІННЯ КОСМІЧНИХ ТІЛ НА ЗЕМЛЮ В МИНОУЛОМУ

На поверхні Землі збереглося не менше 130 кратерів вибухового походження діаметром до 200 км різноманітного вигляду і віку, у тому числі і дуже давніх, виявлених з космосу (рис. 2). Можна зробити висновок, що це далеко не повні дані про кількість великих кратерів на Землі, а лише деяка нижня оцінка.

Останні роки все більше підтверджень знаходить точка зору, що раптове зникнення гігантських динозаврів і деяких інших викопних тварин викликає зіткненням Землі з величезним астероїдом приблизно 65 млн років тому. Ця подія збігається зі зміною двох геологічних епох в історії нашої планети: мезозою і кайнозою. Переход між цими двома епохами позначений масовим вимиранням великих ящерів, динозаврів, що поступилися своїм місцем

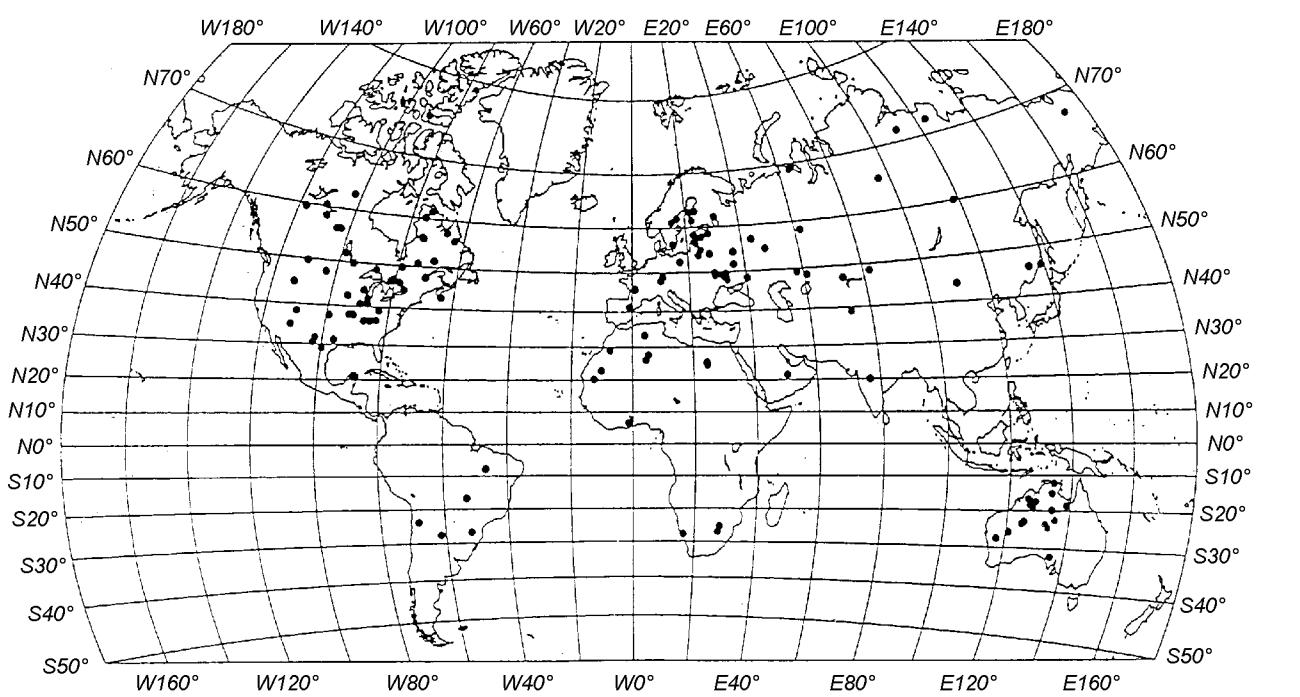


Рис. 2. Великі кратери — астроблеми (діаметром до 200 км) вибухового походження на поверхні Землі

ссавцям та птахам. Вміст іридію в геологічному шарі Землі цього періоду в сотні разів перевищує концентрацію в інших шарах. Як відомо, іридій наявний у відносно великій кількості в метеоритах, які є фрагментами астероїдів. Тому не виключено, що аномальна концентрація іридію та загибель динозаврів мають одну і ту ж причину — падіння на Землю великого астероїда. Оцінки показали, що його діаметр повинен бути 5—10 км. При падінні такого тіла повинен утворитися кратер діаметром 150—200 км. Відмітимо, що такий кратер, діаметром 180 км і віком 64.98 ± 0.04 млн. років, знайдений поблизу узбережжя півострова Юкатан (Мексика).

Інша глобальна космічна катастрофа, що стала причиною вимирання так званої «мамонтової» фауни, відбулася приблизно 10 тис. років тому. Вчені припускають, що після цієї катастрофи людство відродилося, мабуть, вже в новій формі, у вигляді різкого спалаху цивілізацій. Таким чином, вже зараз стає ясно, що глобальні вибухові катастрофи були важливим чинником в процесі розвитку життя на Землі.

Безліч вибухових кратерів на знімках Місяця, Меркурія, Марса, на поверхнях супутників планет-гіантів, що не мають атмосфер, і навіть на невеликих астероїдах — це теж свідоцтва космічних катастроф в нашій планетній системі. 23 березня

1989 р. невідомий раніше астероїд 1989 FC (4581 Asclepius) перетнув орбіту Землі в точці, де вона знаходилася 6 годин тому, пройшовши від Землі на відстані всього 700 тис. км. Цей астероїд розміром в декілька сотень метрів був виявлений вже після проходження ним небезпечного зближення з Землею. Якщо б він зіткнувся з Землею, то утворився б кратер діаметром біля 16 км і глибиною 1.5 км, а в радіусі 160 км від нього все було б зруйноване вибуховою хвилею. Падіння такого астероїда в океан викликало б грандіозне цунамі висотою в сотні метрів. Трохи раніше, 10 серпня 1972 р., об'єкт діаметром понад 25 м пройшов через атмосферу Землі над Канадою і спостерігався на небі як величезна вогняна куля. Незначне збурення орбіти могло б викликати його падіння на Землю і катастрофу місцевого масштабу. Зовсім нещодавно, 1 жовтня 1990 р., відбулося падіння метеороїда діаметром біля 20 м в західній частині Тихого океану. Вибух на висоті 30 км потужністю приблизно 10 Кт супроводжувався дуже яскравим спалахом (-23^m), що був зафікований двома геостаціонарними ШСЗ [39]. Згідно з розsecреченими американськими даними, вибухи в атмосфері Землі такої потужності відбуваються щорічно. 8—9 грудня 1992 р. великий астероїд 4179 Тоутатіс розміром біля 3 км пройшов від Землі на відстані, що дорівнює приблизно восьми відстаням до Місяця. I

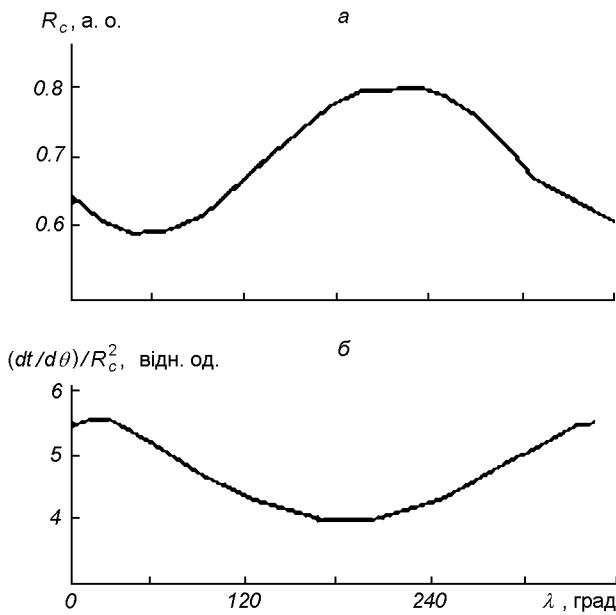


Рис. 3. Залежності від довготи Землі: а — середньої відстані орбіт АНЗ від орбіти Землі; б — середньої концентрації АНЗ

нарешті, унікальна подія липня 1994 р. — зіткнення комети Шумейкера—Леві з Юпітером, ніби попередження про те, що подібні катастрофи в Сонячній системі — це справді реальність.

Сприймання загрози зіткнення Землі з достатньо великим космічним тілом перетворилося з абстрактної можливості в усвідомлення серйозної небезпеки, що піддається кількісній оцінці та пошуку шляхів її запобігання.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ АСТЕРОЇДІВ ПОБЛИЗУ ЗЕМЛІ

З точки зору астероїдної безпеки важливе значення має відкриття якомога більшої кількості АНЗ. На сьогоднішній день серед астероїдів з точно визначеними орбітами відомо близько 100 тіл, що можуть наблизатися до орбіти Землі близьче ніж 0.2 а. о. Однак це лише невелика частка всіх астероїдів у навколоzemному просторі. За деякими оцінками подібних астероїдів з діаметрами понад 100 м повинно бути від кількох тисяч [31], до кількох десятків тисяч [33]. Якщо вся сукупність АНЗ має певні особливості орбіт, то ці особливості можна використовувати при пошуках нових, ще не відкритих АНЗ.

Нами зроблена спроба знайти зміни чисельності АНЗ в різні періоди року. Для цього були викори-

стані орбіти астероїдів з перигелією відстанню $q < 1.2$ а. о., тобто ті, що можуть наблизатися до орбіти Землі на відстань меншу ніж 30 млн км. Серед нумерованих астероїдів таких орбіт виявилося 97 [18]. Спочатку розраховувалась концентрація відібраних орбіт у навколоzemному просторі при різних значеннях екліптичних довгот λ . Для цього обчислювались прямокутні координати x , у точок перетину орбіт окремих астероїдів із площею, перпендикулярною до дотичної до орбіти Землі в точці із заданою довготою. Вісь OX лежить в площині екліптики і направлена від Сонця, вісь OY направлена в північний полюс екліптики. Для кожного окремого значення λ (від 0 до 360°) визначені середні величини відстаней орбіт астероїдів від орбіти Землі:

$$R_c^2 = \frac{1}{97} \sum_i (x_i^2 + y_i^2).$$

Величина R_c є певною характеристикою скучності АНЗ відносно орбіти Землі при даній довготі λ . Залежність $R_c(\lambda)$ виявилась нерівномірною: найбільші значення R_c отримані для $\lambda = 190\ldots 220^\circ$, де астероїди в середньому проходять далі від орбіти Землі, а найменші — для $\lambda = 10\ldots 30^\circ$ (рис. 3, а). Звідси можна зробити висновок про збільшення просторової концентрації орбіт астероїдів поблизу орбіти Землі при $\lambda = 20^\circ$. Число астероїдів, що наблизяються до орбіти Землі на відстань менше 0.1 а. о., при цих довготах теж максимальне. Залежність такого типу повинна бути характерною не лише для астероїдів даної виборки, а й для всієї сукупності АНЗ. Таку думку підтверджує існуючий генетичний зв'язок між АНЗ та астероїдами головного поясу. Адже астероїди головного поясу мають нерівномірний розподіл по довготі перигелю π . Максимум припадає на $\pi = 13^\circ$, мінімум на $\pi = 193^\circ$ (довгота перигелю Юпітера становить 13°). Така особливість орбіт астероїдів певною мірою зберігається при їх трансформації у клас АНЗ, проявляючись у наведеному розподілі на рис. 3, а.

Підвищення концентрації орбіт астероїдів поблизу орбіти Землі при певних довготах не обов'язково вказує на підвищення концентрації самих астероїдів у навколоzemному просторі при цих довготах. Необхідно врахувати імовірність знаходження самих астероїдів при різних значеннях λ . Можна зробити логічне припущення, що імовірність знаходження астероїда в певній точці своєї орбіти обернено пропорційне швидкості зміни його істинної аномалії θ в цій точці. У такому разі величина $(dt/d\theta)/R_c^2$ буде певним чином характеризувати просторову концентрацію астероїдів поблизу Землі при відповідних довготах (періодах

року). Залежність $(dt/d\theta)/R_c^2(\lambda)$ приведена на рис. 3, б. Видно, що при $\lambda = 340\dots40^\circ$ (вересень—жовтень) число астероїдів поблизу Землі повинно бути максимальне, а при $\lambda = 160\dots240^\circ$ (березень—квітень) — мінімальне. Різниця між максимальним та мінімальним значеннями становить близько 30 %. І хоча ця відмінність не дуже значна, все ж її можна використати, наприклад, при пошуках нових АНЗ. Адже величина $(dt/d\theta)/R_c^2$ буде також якоюсь мірою характеризувати імовірність відкриття нових астероїдів із спостережень при певних λ . Величина $dt/d\theta$ визначає імовірність знаходження астероїда поблизу Землі при цих λ , а $1/R_c^2$ — це якась середня характеристика яскравості астероїда. Оскільки пошукові спостереження астероїдів важко проводити неперервно протягом всього року, то навесні їх можна вести менш інтенсивно, а восени активізувати.

РОЗРАХУНКИ УМОВ ЗБЛИЖЕННЯ АНЗ ІЗ ЗЕМЛЕЮ

За підготовленою нами програмою були проведені розрахунки еволюції орбіт астероїдів з метою виявлення їх можливих тісних зближень із Землею протягом наступних ста років. Для цього були відібрані всі відомі на 1996 р. нумеровані астероїди з перигелійною відстанню $q < 1.2$ а. о. [18]. Розрахунки проводились на інтервал часу 1999—2100 рр. В табл. 2 наведені результати обчислень для астероїдів, які будуть наблизятися до Землі на відстань менше 0.1 а. о. Вказані рік, місяць, число події, номер астероїда та мінімальна відстань від Землі. Ці результати свідчать, що дуже тісних зближень відібраних астероїдів із Землею протягом найближчих ста років не буде. Найбільш тісне зближення можна очікувати з астероїдом 4660 у 2060 році — мінімальна відстань від Землі буде 0.0083 а. о., тобто, приблизно в 2.5 рази далі Місяця. Однак такі висновки не можна вважати категоричними. По-перше, ми можемо говорити лише про вже відомі нам астероїди. А навіть за грубими оцінками ще невідкритих АНЗ в десятки і сотні разів більше, ніж відкритих. По-друге, наведені результати не можуть бути абсолютно точними. Річ у тім, що у таких розрахунках не вдається врахувати абсолютно усі можливі збурення. Ми враховували вплив дев'яти планет та трьох найбільш масивних астероїдів (№ 1, 2 та 4). Мінімальні відстані при врахуванні впливу цих астероїдів та без такого врахування інколи відрізнялись на 0.01 а. о. І ми не можемо бути впевненими в тому, що досліджуваний нами астероїд не зазнає тісного зближення із невідомим нам іншим астероїдом, що

призведе до більш тісного зближення з Землею. Тому із наведених результатів можна зробити тільки такі висновки:

- 1) потрібно організувати регулярні спостереження та вивчення руху наведених астероїдів з метою уточнення їх орбіт та коригування умов зближень із Землею;
- 2) необхідно проводити пошуки інших навколоzemних астероїдів та проводити розрахунки еволюції їх орбіт.

МЕТЕОРНІ РОЇ ТА АНЗ. НОВИЙ МЕТОД ПОШУКУ АНЗ

Для отримання надійних оцінок реальної небезпеки необхідно використати і інші методи досліджень АНЗ, до яких відноситься побічний засіб оцінки елементів орбіт АНЗ за відомими орбітами метеорних потоків, батьківськими тілами яких є ці астероїди.

Ідею методу найпростіше пояснити, скориставшись класичним прикладом з метеорної астрономії. Одним з найбільш відомих щорічних метеорних потоків є потік Гемінід. Він спостерігався вже в XVI ст. [23], а з другої половини XIX ст. відома орбіта потоку, однак його батьківське тіло було відкрите лише в кінці XX ст. (3200 Phaethon 1983

Таблиця 2. Дати і відстані зближень астероїдів із Землею в найближчі 100 років (1 а. о. = 150 млн км)

Рік	Дата	Номер	Δ , а. о.
2002	22.01	4660	0.029026
2017	24.02	5604	0.033570
2017	27.09	5189	0.061173
2021	11.12	4660	0.026371
2022	27.05	5693	0.070203
2023	23.08	6037	0.040532
2026	30.12	5693	0.053487
2027	07.06	4953	0.031656
2036	23.06	5604	0.066105
2039	08.07	5143	0.067308
2041	27.02	6037	0.024282
2043	24.02	5604	0.058171
2046	26.08	4769	0.024993
2056	25.08	6037	0.061877
2058	05.06	953	0.023420
2060	14.02	4660	0.008304
2062	22.06	5604	0.060007
2071	30.01	4660	0.021499
2077	21.09	5189	0.051060
2079	22.08	6037	0.034252
2080	28.08	4769	0.060613
2081	04.12	4660	0.066355
2088	21.06	5604	0.056038
2092	07.01	5797	0.070481

ТВ). Таким чином, орбіта АНЗ Phaethon була відома за сто років до його відкриття. На нинішній час відомо сотні і тисячі метеорних потоків, і тільки для декількох десятків з них знайдені батьківські тіла. Якщо і у інших метеорних роїв, які спостерігаються з Землі як метеорні потоки, існують джерела, що підтримують популяцію метеороїдів на достатньому рівні, то з каталогів орбіт метеорних потоків можна отримати цінну інформацію про АНЗ. Тому метеорний рій, а деколи і метеорний потік, можна розглядати як пиловий слід у міжпланетному просторі батьківського тіла. Метеорні потоки спостерігаються лише з Землі, іхні орбіти завжди перетинаються з орбітою Землі, а орбіта батьківського тіла, зв'язаного з потоком, якщо і не перетинається з орбітою Землі, то розміщена поблизу неї і в процесі еволюції може перетнути її.

Треба підкреслити, що в такому аспекті ще ніхто не аналізував метеорні потоки, а зважаючи на те, що найбільша база орбіт метеорних потоків є в Україні, це дозволяє нам прояснити деякі принципові аспекти космічної небезпеки для Землі. Ця база орбіт індивідуальних метеорів отримана за результатами багаторічних спостережень слабких метеорів радіолокаційним методом в Харківському технічному університеті радіоелектроніки. Зараз база містить 233543 орбіти, що в 5—6 разів більше, ніж в усіх разом узятих опублікованих каталогах. З них було відібрано, згідно з роботою [6], 159787 орбіт. За методикою, що наведена в цій роботі, було виділено 5160 потоків, кожний з яких містить не менше 5 орбіт. Вже попередній аналіз харківського каталогу [3, 4] показав, що в ньому є велика кількість потоків, орбіти яких за величинами всіх елементів, окрім нахилу орбіт, належать до області біляземного простору, де розташовані відомі ААА-астероїди. Нахили орбіт лежать в діапазоні 0—180°, тоді як для ААА-астероїдів вони обмежені величиною 70°. Показано, що із всіх згрупованих в потоки метеороїдів, які мають масу більшу за 10^{-5} г і перетинають сферу радіусом 1 а. о. з центром в Сонці, 72 % є продуктом дезінтеграції ААА-астероїдів, 3 % походять з основного астероїдного поясу, 19 % — від дезінтеграції ядер короткоперіодичних і 6 % — довгоперіодичних комет.

Щоб врахувати астрономічну селекцію при спостереженні метеорних потоків, необхідно визначити космічну вагу (астрономічний фактор спостережуваності) потоку. Імовірність зустрічі космічного тіла з планетою можна подати у вигляді: $P = P_1 P_2$, де P_1 — апріорна імовірність зближення орбіт, P_2 — умовна імовірність попадання тіла в атмосферу планети за умови, що зближення орбіт відбулося.

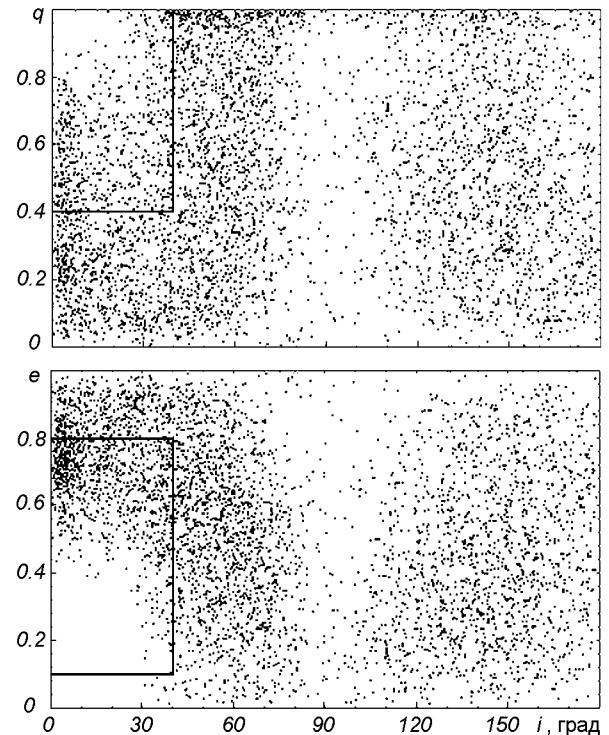


Рис. 4. Двопараметричний розподіл елементів орбіт метеорних потоків. Виділено області ААА-астероїдів

При обчисленні імовірності зустрічі Землі з метеорним роєм, коли байдуже який конкретно метеороїд попадає в атмосферу Землі, необхідно врахувати лише вплив вікових збурень, тобто знайти імовірність P_1 . Тоді астрономічний фактор спостережуваності — астрономічну вагу AW рою — потрібно обчислювати згідно з умовою $AW = P_1^{-1}$, а імовірність P_1 за формулою [35]:

$$P_1 = (4R_{sc}/\pi)(\operatorname{tg}^2\gamma + \operatorname{cosec}^2 i)^{1/2},$$

де R_{sc} — радіус захоплення Землі, γ — кут між дотичною і радіусом-вектором орбіти потоку у вузлі, i — нахил орбіти потоку. Необхідно підкреслити, що врахування астрономічної ваги рою дозволяє перейти від розподілу орбіт метеорних потоків до оцінок розподілу орбіт батьківських тіл, що перетинають сферу навколо Сонця радіусом 1 а. о. Тому «виправлені» розподіли важливі для оцінки результатів, одержуваних тими засобами спостережень, які виявляють також об'єкти, орбіти яких не обов'язково перетинаються з орбітою Землі. До таких відносяться програми пошуку АНЗ, що підготовлені в нинішній час різними науковими колективами.

З 5160 потоків харківського каталогу були ві-

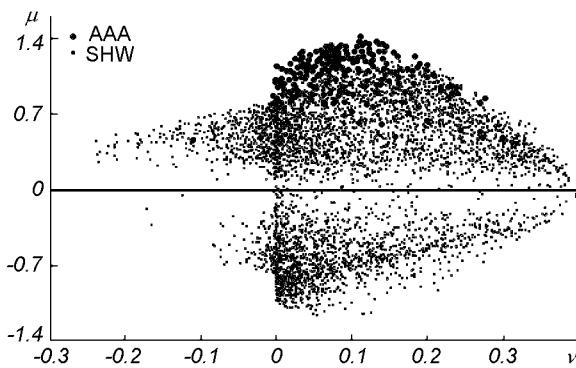


Рис. 5. Розподіл метеорних потоків та ААА-астероїдів по квазісталим параметрам μ і ν

дібрани лише ті, орбіти яких розміщені всередині орбіти Юпітера, тобто орбіти з афелійними відстанями $Q < 4.8$ а. о. Таких виявилося 4810 (93 %).

На рис. 4 наведені точкові діаграми (q , i) та (e , i) «видимих» розподілів орбіт потоків, де e — ексцентризитет орбіти. На кожній з діаграм виділені області, куди попадає більшість (90 %) ААА-астероїдів. Відзначимо, що ці області охоплюють лише малу частину (< 20 %) орбіт потоків, а отже, і їхніх батьківських тіл.

Для виявлення можливих генетичних зв'язків метеороїдів з кометами та астероїдами корисними можуть виявитися орбітальні характеристики, що в найменшій мірі підпадають під вплив збурюючих факторів. До таких квазісталих параметрів відносяться інтеграли руху, отримані в роботах [12, 15]:

$$\mu = [a(1 - e^2)]^{1/2} \cos i,$$

$$\nu = e^2(0.4 - \sin^2 i \sin^2 \omega),$$

де ω — аргумент перигелію.

На рис. 5 наведена точкова діаграма μ , ν . Тут великими точками позначені положення ААА-астероїдів, а малими — потоків. З аналізу діаграми випливає, що ААА-астероїди розміщені на окраїні області, яку займають потоки та їхні батьківські тіла.

Основний висновок, який можна зробити з аналізу розподілу орбіт метеорних потоків, що являють собою пилові сліди більших батьківських тіл, полягає у тому, що дослідження орбіт потоків харківського банку даних дозволяє виявити величезну кількість АНЗ, імовірність відкриття яких традиційними прямими методами в нинішній час мала. В той же час переважна більшість цих об'єктів мають розміри більше 1 км (метод розра-

Таблиця 3. Розподіл імовірності зіткнень батьківських тіл метеорних потоків з Землею

$p \cdot 10^6$	Кількість зіткнень	% від загальної кількості
0...0.1	3762	84.8
0.1...0.2	415	9.36
0.2...0.3	113	2.55
0.3...0.4	45	1.01
0.4...0.5	29	0.65
0.5...0.6	19	0.43
0.6...0.7	14	0.32
0.7...0.8	7	0.16
0.8...0.9	3	0.07
0.9...1.0	2	0.04
1.0...1.1	6	0.14
1.1...1.2	2	0.04
1.2...1.3	1	0.02
1.3...1.4	2	0.04
1.4...1.5	3	0.07
1.5...1.6	4	0.09
1.6...1.7	3	0.07
1.7...1.8	1	0.02
1.8...1.9	2	0.04
3.2...3.3	2	0.04
0...3.3	4435	100

хунків наведено в кінці статті), тому можуть представляти реальну небезпеку для Землі і, на нашу думку, не повинні ігноруватися при оцінці космічної небезпеки. Щоб оцінити імовірність падіння батьківських тіл метеорних потоків на Землю, ми скористалися наведеними вище квазісталими параметрами μ і ν та методикою [7, 8].

В табл. 3 наведено розподіл імовірності зіткнення батьківських тіл метеорних потоків з Землею. Із 4810 батьківських тіл 4435 можуть зіткнутися з Землею, а для 375 імовірність зіткнення дорівнює нулю.

Запропонований новий метод пошуку АНЗ не позбавлений недоліків:

- відомі роботи, в яких показано, що в процесі еволюції молодий метеорний рій, породжений якимсь батьківським тілом, може трансформуватися в декілька метеорних роїв, які будуть спостерігатися на Землі як кілька окремих метеорних потоків. Батьківське тіло буде належати одному з роїв. Це означає, що наведені імовірності зіткнень батьківських тіл з Землею (табл. 3) можуть бути завищенні;
- поки що не існує методу визначення положення батьківського тіла на орбіті метеорного рою;
- оцінки імовірності зіткнень одержані за умови, що батьківське тіло перебуває в середині рою, і його орбіта не зазнає помітних збурень, окрім вікових.

ПРО РОЗРАХУНКИ ДОПЛИВУ КОСМІЧНОЇ РЕЧОВИНИ НА ЗЕМЛЮ В ШИРОКОМУ ІНТЕРВАЛІ МАС

Питанню допливу твердої складової космічної речовини на Землю присвячені численні роботи. Вони основані на різноманітних засобах реєстрації та досліджень і відносяться до широкого спектру розмірів (мас) тіл: від найдрібніших пилинок мікронного розміру з масами 10^{-11} – 10^{-12} г до великих астероїдних і кометних тіл з розмірами в десятки і сотні метрів.

Для отримання деякого середнього інтегрального розподілу (з масою не менше даної) допливу часток на Землю в широкому інтервалі мас необхідно провести аналіз допливу тіл, отриманих різними методами, в окремих невеликих інтервалах мас. На основі таких даних можна скласти загальну інтегральну (кумулятивну) залежність допливу космічних тіл на Землю. Ця проблема цікавила багатьох дослідників. Мабуть першим, хто побудував таку залежність, був Уіппл [43]. Потім це питання досліджувалося в роботах [1, 16, 20] та ін. Ми використаємо деякі дані із згаданих робіт, а також результати, отримані за останні роки.

Виходячи із відомого степеневого розподілу тіл по масі, запишемо інтегральну залежність допливу космічних тіл на Землю в кожному інтервалі мас:

$$\lg N = -A - B \lg M, \quad (2)$$

де N — число частинок з масами, не меншими M (в грамах) і які на відстані Землі від Сонця (1 а. о.) перетинають один квадратний сантиметр за секунду. Коефіцієнт B дорівнює зменшеному на одиницю параметру диференційного розподілу тіл по масі, тобто $B = s - 1$.

1. В області найдрібніших пилових частинок (від 10^{-12} до 10^{-7} г), реєстрація яких здійснювалася космічними апаратами і висотними ракетами, використаємо узагальнену залежність з роботи [13], з якої випливає $A = 15.1$, $s - 1 = 0.6$. На рис. 6 залежність позначена $D1$. Аналіз допливу космічної речовини в інтервалі мас від 10^{-11} до 10^{-7} г, виконаний в монографії [11], дає такі коефіцієнти: $A = 14.1$, $s - 1 = 0.55$, що на рис. 6 представлено як $D2$. Видно, що відрізки $D1$ і $D2$ практично не відрізняються між собою.

2. Узагальнення метеорних даних [11], отриманих із радіолокаційних та оптичних спостережень, в діапазоні мас від 10^{-6} до 10^2 г приводить до залежності, що має коефіцієнти $A = 18.8$, $s - 1 = 1.25$. На рис. 6 апроксимація позначена літерою M . Результати не суттєво відрізняються від тих, які отримав Уіппл [43] для інтервалу мас від 10^{-5} до 10^2 г на основі даних [19, 24, 25]: $A = 18.3$, $s - 1 = 1.34$.

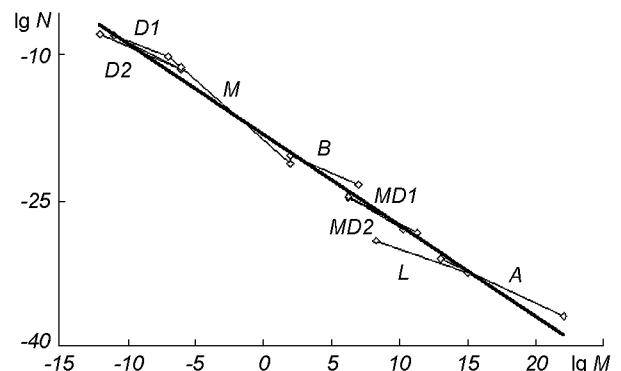


Рис. 6. Інтегральний доплив N (N , $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$) космічних тіл на Землю з масами, що не менші M (M , г)

3. Для тіл, що породжують боліди, інтегральний розподіл мас в інтервалі від 10^2 до 10^7 г можна апроксимувати формулою (2) з коефіцієнтами $A = 19.1$, $s - 1 = 0.62$. Залежність отримана Мак-Кроскі [28] і на рис. 6 позначена літерою B .

4. Доплив на Землю тіл з масами $M \geq 10^6$ г. Нещодавно опублікована робота [38], в якій автор детально проаналізував дані вимірювання акустично-гравітаційних хвиль в атмосфері Землі, зареєстровані мікробарографами Військово-повітряних сил США в період з 1960 по 1980 рр. Ударні та вибухові хвилі, як доводиться в указаній роботі, пов'язані з польотом та руйнуванням в атмосфері великих метеороїдів. В підсумку отримана інтегральна залежність для тіл, що попадають в атмосферу Землі і енергія яких не менша E , в інтервалі енергій від 0.1 до 10^4 Кт,

$$\lg N = -11.01 - 0.731 \lg E,$$

де N — в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, E — в ерг*. Щоб перейти від енергії до мас тіл, що породжують акустично-гравітаційні хвилі, ми провели аналіз даних реєстрації болідів Прерійною мережею США [29, 30] і отримали, що середня швидкість входу в атмосферу болідоутворюючих тіл з масами, не меншими 1 кг, складає 21 км/с. На підставі цього отримали інтервал мас $1.9 \cdot 10^6$ – $1.9 \cdot 10^{11}$ г та необхідну нам залежність з коефіцієнтами $A = 20.13$; $s - 1 = 0.73$. На рис. 6 залежність показана у вигляді відрізка $MD1$.

Недавно опубліковані результати реєстрації світлових спалахів від болідів в земній атмосфері фотодіодами корпорації Sandia National Laboratories, що були встановлені на геостаціонарних

* 1 ерг = 10^{-7} Дж

супутниках США [21, 34, 41]. На протязі 1994—1996 рр. зареєстровано 51 світлове явище (в одному випадку знайдено метеорит Сент Роберт) в діапазоні енергій $0.1 - 10^3$ Кт. Для середньої швидкості входу тіл в атмосферу 21 км/с такі енергії відповідають інтервалу мас $1.9 \cdot 10^6 - 1.9 \cdot 10^{10}$ г. Інтегральне співвідношення для числа падінь метеороїдів за рік на всю Землю в залежності від енергії E (в Кт), згідно з роботою [34] має вигляд

$$N(E) = 10.0/E^{0.87}.$$

Звідси отримуємо інтегральну залежність числа тіл від маси у прийнятій системі одиниць, в якій $A = 18.89$; $s - 1 = 0.87$. На рис. 6 апроксимація показана прямою $MD2$.

5. Для інтервалу мас від $2 \cdot 10^8$ до 10^{14} г використовуємо залежність [43] «для всіх місячних кратерів»: $A = 23.3$, $s - 1 = 0.6$ (позначена літерою L).

6. Для астероїдів сімейства Аполлона, що наближаються до орбіти Землі, Уїппл [43] наводить оцінку інтегрального допливу $N = 2.0 \cdot 10^{-33} \text{ см}^{-2} \text{ c}^{-1}$ для тіл з масами $M \geq 2.8 \cdot 10^{15}$ г. За даними [20] основний вклад в інтегральний доплив космічних тіл на Землю припадає на ці маси. Згідно з роботою [37], диференційний розподіл по масі АНЗ має параметр $s = 1.66$, а за результатами [26] для всіх астероїдів $s = 1.65$. На підставі наведених даних отримали інтегральну залежність для допливу тіл в інтервалі мас від 10^{15} до 10^{22} г: $A = 22.7$, $s - 1 = 0.65$ (відрізок A). Видно, що залежність для астероїдів A практично є продовженням відрізка L для місячних кратерів.

На підставі наведених даних методом найменших квадратів отримана загальна залежність інтегрального допливу тіл на Землю в широкому інтервалі мас (від 10^{-12} до 10^{22} г) (рис. 6).

$$\lg N = -18.17 - 0.936 \lg M, (r^2 = 0.9859) \quad (3)$$

або для числа тіл, які проникають в атмосферу Землі за рік з масами, що менші M ,

$$\lg N = 8.05 - 0.936 \lg M. \quad (4)$$

Хоча співвідношення (4) лише в середньому характеризує темп допливу космічних тіл різних мас на Землю, його можна застосовувати для різноманітних оцінок імовірності зіткнення тіл з тим чи іншим об'єктом. Наведемо приклади:

1. Для космічного корабля на навколоzemельній орбіті метеорну небезпеку при відносній швидкості біля 30 км/с становлять уже частинки з масою $M \geq 10^{-6}$ г, менші частинки — створюють лише «космічну ерозію» поверхонь сонячних батарей та інших частин. За формулою (3) оцінимо середню імовірність зустрічі космічного апарату, який зна-

Таблиця 4. Імовірність зіткнень космічного апарату з метеорідними частинками, що мають маси M , не менші даної, та необхідна мінімальна товщина d захисного екрана

$M, \text{ г}$	$P \cdot 10^3$	Енергія, 10^3 Дж	$d, \text{ см}$
1	0.019	450	1.50
10^{-2}	1.2	4.50	0.30
10^{-3}	9.7	0.45	0.15
10^{-5}	600	0.00(4)	0.03

ходиться на відстані 1 а. о. від Сонця протягом одного року і має ефективну площину 100 м^2 , з космічними частинками, що мають масу, не меншу M . Результати обчислень наведені в табл. 4.

Розрахунки числа зіткнень поверхонь штучних супутників Землі з відомими геоцентричними орбітами з частинками, що мають маси, не менші 10^{-9} г, в залежності від положення супутника на орбіті наведені на рис. 7 та рис. 8.

2. На рис. 9 приведено сезонний хід інтегральної густини допливу на Землю метеорних часток з масами $M \geq 5 \cdot 10^{-6}$ г за харківськими даними [3]. З року в рік оцінки допливу змінюються не більше ніж на 5—10 %.

3. За даними табл. 3 84.8 % батьківських тіл метеорних роїв мають імовірність зіткнення з Землею приблизно $5 \cdot 10^{-8}$. Враховуючи зауваження, що ця імовірність, можливо, завищена в декілька раз, приймемо її значення рівним 10^{-8} . У цьому випадку із залежності (4) випливає, що маси більшості батьківських тіл становлять $\approx 10^{15}$ г, а діаметри — 1 км.

4. Із формулі (4) ми отримали залежність для

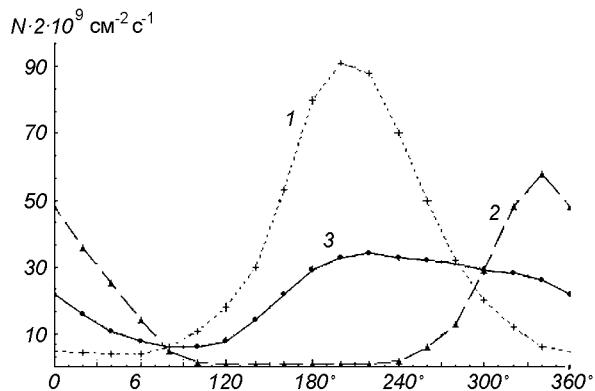


Рис. 7. Число зіткнень супутника типу «Мир», — майже колової орбіти ($H_{\max} = 365 \text{ км}$, $H_{\min} = 335 \text{ км}$, $e = 0.002$, $i = 52^\circ$), — з космічними частинками в залежності від істинної аномалії. 1 — для фронтальної платформи, 2 — для тильної платформи, 3 — для сферичної поверхні

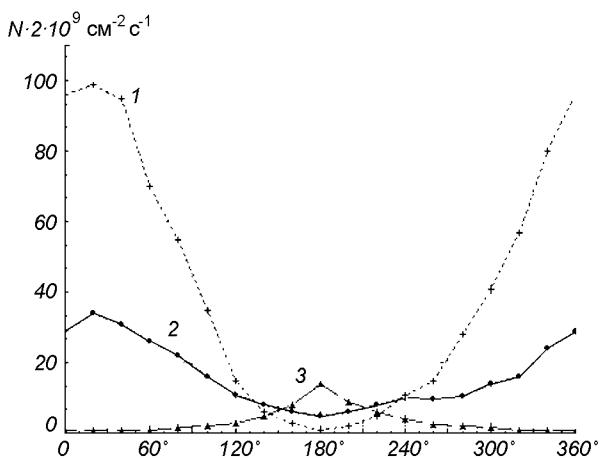


Рис. 8. Число зіткнень супутника типу «Молния», — ексцентрична орбіта ($H_{\max} = 40000 \text{ км}$, $H_{\min} = 550 \text{ км}$, $e = 0.74$, $i = 15^\circ$), — з космічними частинками в залежності від істинної аномалії для випадку, коли аргумент перигелія $\omega = 90^\circ$, а довгота вихідного вузла $\Omega = 0^\circ$. 1 — для фронтальної платформи, 2 — для тильної платформи, 3 — для сферичної поверхні

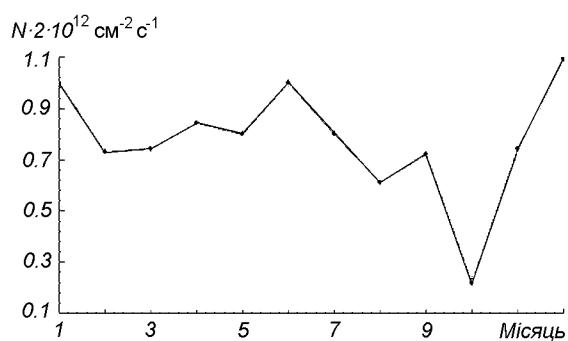


Рис. 9. Варіація інтегрального допливу метеорної речовини протягом року

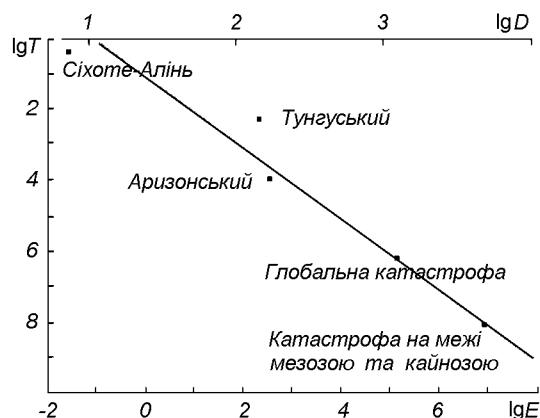


Рис. 10. Середня періодичність (T , роки) падінь на Землю тіл різного діаметра або енергії (E , Мт)

середнього інтервалу T (в роках) між падіннями на Землю тіл різного діаметра D (в метрах) у вигляді:

$$\lg T = -2.25 + 2.81 \lg D.$$

При цьому прийняли, що густину тіла дорівнює $3 \text{ г}/\text{см}^3$. Якщо прийняти середню швидкість входження тіл в атмосферу рівною $20 \text{ км}/\text{s}$, то залежність T від енергії E (в Мт) матиме вигляд:

$$\lg T = 1.61 + 0.936 \lg E.$$

На рис. 10 це рівняння показане прямою лінією. окремі «точки» на рис. 10 відносяться до відомих явищ: Сіхоте-Алінського, Тунгуського та Аризонського, а також до падінь тіл діаметром 1 км (глобальна катастрофа) і 5 км (катастрофа на межі мезозойської та кайнозойської ер). Для Сіхоте-Алінського та Тунгуського падінь використані дані, наведені вище. Розміри Аризонського кратера свідчать, що він утворений при падінні тіла (залізного) зі швидкістю, яка не менша $11 \text{ км}/\text{s}$. Якщо навіть прийняти максимально допустимий інтервал швидкості зіткнень тіл астероїдного пояса з Землею (11 — $60 \text{ км}/\text{s}$) (до них ми відносимо і Аризонський метеороїд), то маса тіла буде знаходитися в межах від $2 \cdot 10^7$ до $6 \cdot 10^5$ тонн (відповідно $D = 160$ — 50 м при густині $7.8 \text{ г}/\text{см}^3$), що згідно з табл. 1 свідчить про вибуховий характер Аризонського падіння. Щоб вирахувати положення Аризонського явища на рис. 10, ми прийняли такі дані:

- швидкість падіння метеорита на земну поверхню дорівнює $20 \text{ км}/\text{s}$;

- кратер має форму кульового сегмента діаметром 1200 м і глибиною 175 м . Звідси випливає, що викинута маса речовини $M_b = 2 \cdot 10^{14} \text{ г}$ при густині $2 \text{ г}/\text{см}^3$;
- кінетична енергія падіння метеорита ($M_m V^2/2$) дорівнює $M_b Q$, де Q — питома енергія руйнування. Для Q ми прийняли значення $5 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$, що приблизно в два рази менше питомої енергії випаровування.

При цих умовах маса метеорита дорівнює $5 \cdot 10^6 \text{ т}$ ($D = 124 \text{ м}$). Середній інтервал між падіннями таких тіл становить ≈ 7000 років.

Необхідно зауважити, що позначення «Сіхоте-Алінський», «Тунгуський» та «Аризонський» на рис. 10 побудовані в системі координат $\lg E$, $\lg T$, а координата $\lg D$ для них дещо відрізняється, тому що вона відповідає тілам з густиною $3 \text{ г}/\text{см}^3$ і швидкістю входження в атмосферу $20 \text{ км}/\text{s}$.

5. Із формул (3) або (4) та робіт [29, 30] можна зробити такі висновки.

- Щодоби в земну атмосферу входить біля 480

метеороїдів з масами, не меншими 1 кг. З них приблизно 30 % досягають висот від 30 км та менше. Рух таких тіл в атмосфері Землі супроводжується ударними хвилями та тепловими вибухами, які становлять реальну небезпеку для авіалайнерів.

б) Кожен рік на Землю падає біля 900 метеоритів. Наведена вище оцінка (500 метеоритів за рік), отримана за опублікованими даними, не суперечить нашій оцінці, бо в першому випадку іде мова про метеорити, маси яких не менші 1 кг, а в нашому випадку — про тіла з початковою масою не менше 1 кг.

в) Такі явища, як Тунгуське (кометне тіло $D \approx 60$ м, $M \approx 10^{11}$ г), відбуваються один раз за 180 років.

г) Загальний доплив космічних тіл на Землю за рік в інтервалі мас від 10^{-12} до 10^{22} г становить $4.2 \cdot 10^7$ кг. Якщо за останній мільярд років доплив космічної речовини не змінювався, то радіус нашої планети за цей час збільшився приблизно на 4 см.

ВИСНОВКИ

Проблема метеорно-астероїдно-кометної небезпеки — це комплексна науково-технічна проблема. Вона охоплює широке коло задач і для її вирішення необхідно використовувати методи та засоби різних галузей науки і техніки.

В даній роботі на основі теоретичних досліджень та спостережних даних отримані наступні результати.

1. Обґрунтована необхідність подальшого всеобщого вивчення малих тіл Сонячної системи, орбіти яких наближаються до орбіти Землі і становлять потенційну загрозу у зв'язку з можливими зіткненнями з космічними апаратами, з атмосферою та поверхнею Землі.

2. На основі даних спостережень метеорних потоків та розрахунків еволюції орбіт астероїдів запропоновані нові підходи щодо пошуку ще не відкритих космічних тіл, які можуть становити небезпеку для нашої планети.

3. Проведено аналіз допливу речовини космічних тіл на Землю в широкому інтервалі мас.

4. Сформульовано критерій поділу метеоритів на ударні та вибухові.

Очевидно, що астероїдно-кометна небезпека є однією з глобальних проблем людства, яку необхідно розв'язувати об'єднаними зусиллями різних країн. Усвідомлення реальної загрози зіткнень Землі з космічними тілами збіглося з часом, коли рівень розвитку науки і техніки дає принципову

можливість практичного вирішення проблеми захисту земної цивілізації від таких зіткнень. Тому передові країни світу зараз розробляють програми захисту від астероїдно-кометної небезпеки. Україна має достатній науковий потенціал, щоб брати участь в такій міжнародній кооперативній програмі.

1. Бронштэн В. А. Природа и происхождение метеороидов // Проблемы происхождения тел Солнечной системы / Под ред. В. К. Абалакина. — М.-Л.: АН СССР, 1975.—С. 265—301.
2. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981.—416 с.
3. Волощук Ю. И., Воргуль А. В., Кащеев Б. Л. Метеорный комплекс вблизи орбиты Земли: спорадический фон, потоки, ассоциации. 3. Источники потоковых и спорадических метеорных тел // Астрон. вестник.—1997.—31, № 4.—С. 345—369.
4. Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л. Метеорный комплекс вблизи орбиты Земли: спорадический фон, потоки, ассоциации. 2. Сравнительный анализ некоторых статистических характеристик потоковых и спорадических метеорных тел // Астрон. вестник.—1996.—30, № 6.—С. 541—560.
5. Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л., Кручиненко В. Г. Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наук. думка, 1989.—294 с.
6. Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л., Подоляка В. А. Метеорный комплекс вблизи орбиты Земли: спорадический фон, потоки, ассоциации. 1. Методика выделения потоков и ассоциаций из выборки орбит индивидуальных метеоров большого объема // Астрон. вестник.—1995.—29, № 5.—С. 439—449.
7. Крамер Е. Н., Шестака И. С. Квазистационарные параметры малых тел Солнечной системы // Астрон. вестник.—1987.—21, № 1.—С. 75—83.
8. Крамер Е. Н., Шестака И. С. Вероятность выпадения на поверхность планет межпланетных тел типа Аполлона—Амура // Астрон. вестник.—1987.—21, № 3.—С. 225—232.
9. Кручиненко В. Г. Определение физических характеристик метеорообразующего тела Стерлитамак // Астрон. вестник.—1992.—26, № 4.—С. 104—112.
10. Кручиненко В. Г. Анализ изменения физических характеристик метеорообразующего тела Стерлитамак вдоль пути // Астрон. вестник.—1993.—27, № 6.—С. 87—94.
11. Лебединец В. Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980.—247 с.
12. Лидов М. Л. Эволюция орбит искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений тел // Искусств. спутники Земли.—1961.—№ 8.—С. 5—45.
13. Мазец Е. П. Микрометеориды в космическом пространстве // Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве / Под ред. Н. Б. Дивари. — М.: Наука, 1971.—С. 13—23.
14. Медведев Ю. Д., Свешников М. Л., Сокольский А. Г. и др Астероидно-кометная опасность. — Санкт-Петербург: Ин-т теорет. астрономии., 1996.—244 с.
15. Моисеев Н. Д. О некоторых основных упрощенных схемах небесной механики, получаемых при помощи осреднения ограниченной круговой задачи трех тел // Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга.—1945.—15, № 1.—С. 75—79.
16. Симоненко А. Н., Левин Б. Ю. Приток космического вещества на Землю // Метеоритика.—1972.—31.—С. 45—56.
17. Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И. Аэродинамика

- бolidov. — М.: Физматлит, 1995.—240 с.
18. Эфемериды малых планет на 1996 г. — Санкт-Петербург: Ин-т теорет. астрономии, 1995.
 19. Broun H. The density and mass distribution of meteoritic bodies in the neighborhood of the earth's orbit // J. Geophys. Res.—1960.—**65**.—P. 1679—1683.
 20. Cepelcha Z. Influx of interplanetary bodies onto Earth // Astron. and Astrophys.—1992.—**263**.—P. 361—366.
 21. Cepelcha Z., Spalding R. E., Jacobs C., Tagliaferri E. Sizes and masses of satellite observed meteoroids // Proc. Comet Day II (5th Inter. Conf. Space-96), Albuquerque, New Mexico, June 1—6, 1996. — Albuquerque, 1996.
 22. Chapman C. R., Morrison D. Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard // Nature.—1994.—**367**.—P. 33—40.
 23. Hasegawa I. Historical records of meteor showers // Meteoroids and their parent bodies / Eds J. Stohl, I. P. Williams. — Astron. Inst. Slovak Acad. Sci. Bratislava, 1993.—P. 209—223.
 24. Hawkins G. S. Asteroidal fragments // Astron. J.—1960.—**65**.—P. 318—322.
 25. Hawkins G. S. and Upton E. K. L. The influx rate of meteors in the Earth's atmosphere // Astrophys. J.—1958.—**128**.—P. 727—735.
 26. Klacka J. Mass distribution and structure of the asteroid belt // Acta Astronomica et Geophysica Univ. Comenianae.—1995.—**17**.—P. 62—76.
 27. Lupishko D. F., Di Martino M. Physical properties of near-Earth asteroids // Planetary and Space Science.—1998.—**46**, N 1.—P. 47—74.
 28. McCrosky R. E. Distribution of large meteoritic bodies // Smithson. Astrophys. Obs. Spec. Rep.—1968.—N 280.
 29. McCrosky R. E., Shao C.-Y. and Posen A. Prairie network fireball data. I. Summary and orbits // Center for Astrophysics. Prep. Ser.—1976.—N 665.
 30. McCrosky R. E., Shao C.-Y., and Posen A. Prairie network fireball data. II. Trajectories and light curves // Center for Astrophysics. Prep. Ser.—1977.—N 721.
 31. McFadden L. A., Benadix A. K., Morrow E. M. Population model of near-Earth asteroids: understanding the observational selection effects // Near-Earth Asteroids: Inter. Conf., San Juan Capistrano, Calif., 30 June—3 July, 1991; Program. — San Juan Capistrano, 1991.—P. 23.
 32. Morrison D. (ed.) The Spaceguard Survey: Report of the NASA International Near-Earth-Object-Detection Workshop. — Pasadena: JPL, 1992.—66 p.
 33. Muinonen K., Bowell E., Shoemaker E. M., Wolfe R. F. Discovery of Earth-crossing asteroids. II. Modelling the sky-plane distribution // Near-Earth asteroids: Inter. Conf., San Juan Capistrano, Calif., 30 June—3 July, 1991; Program. — San Juan Capistrano, 1991.—P. 26.
 34. Nemtchinov I. V., Svetsov V. V., Kosarev I. B., et al. Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // Icarus.—1997.—**130**.—P. 259—274.
 35. Opik E. J. Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter // Proc. Roy. Irish Acad. —1951.—**54**, N 2.—P. 165—199.
 36. Ostro S. J., Campbell D. B., Chandler J. F., et al. Asteroid 1986 DA: Radar evidence for a metallic composition // Science.—1991.—**252**.—P. 1399—1404.
 37. Rabinowitz D. L., Bowell E., Shoemaker E., Muinonen K. The population of Earth-crossing asteroids / Hazards due to comets and asteroids / Ed. T. Gehrels. — Tucson: Univ. Arizona press, 1994.—P. 285—312.
 38. ReVelle D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves // Annals of the New York Academy of Sciences.—1997.—**822**.—P. 284—300.
 39. Reynolds D. A. Fireball observation via satellite // Draft Proc. of the Near-Earth-Object Interception Workshop / Eds G. H. Canavan et al. — Los Alamos National Lab., 1992.—P. 221—226.
 40. Robertson H. P. Dynamical effects of radiation in the Solar system // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1937.—**97**, N 6.—P. 423—438.
 41. Tagliaferri E. Satellite observations of large meteoroid impacts // Meteoroid Impact Workshop, Albuquerque, New Mexico, Sandia National Laboratories, June 4—7, 1996. — Albuquerque, 1996.
 42. Whipple F. L. The theory of micro-meteorites. Part I. In an isothermal atmosphere // Proc. Nat. Acad. Sci. Amer.—1950.—**36**, N 12.—P. 686—695.
 43. Whipple F. L. On maintaining the meteoritic complex // Studies in interplanetary particles / Smithson. Astrophys. Obs. Spec. Rep.—1967.—N 239.—P. 3—45.

HAZARDS DUE TO METEORS AND ASTEROIDS AND INFLUX OF COSMIC MATTER ON THE EARTH

V. G. Kruchynenko, Yu. I. Voloshchuk, B. L. Kashcheev,
A. M. Kazantsev, D. F. Lupishko, and Ya. S. Yatskiv

The problem of meteor and asteroid hazards is considered on the basis of modern studies of small bodies in the solar system. Using one of the largest meteor data banks and the results of calculations of asteroid orbits, new approaches to the search for space bodies which may be dangerous to our planet are formulated. The problem of destruction of meteoroids of various masses in the atmosphere and on the surface of the Earth is considered, and a criterion for distinguishing between impact and explosion meteorites is presented. Analysis of the data on influx of cosmic bodies on the Earth in a wide range of masses is made. The probability of collision of space vehicles with meteoroid particles is given.