

Погляд мінералога на астрономічну проблему

Тунгуське космічне тіло



Віктор Квасниця

доктор геол.-мін. наук,
професор,
завідувач відділу проблем
алмазності
Інституту геохімії, мінералогії
та рудоутворення імені
М.П. Семененка НАН України,
президент Українського
мінералогічного товариства,
м. Київ

Тунгуська катастрофа 1908 року: мікрофрагменти метеориту знайдено

Грандіозне явище природи — космічна катастрофа 30 червня 1908 р. у Центральному Сибіру, в басейні річки Підкам'яна Тунгуска, як і раніше привертає увагу дослідників. Тоді масштаби і наслідки цієї події торкнулися значної частини земної кулі. Минуло понад 80 років досліджень цього явища, висловлено безліч наукових і фантастичних гіпотез про його природу. Чим же було Тунгуське космічне тіло? Кометою чи метеоритом — великим фрагментом астероїда? Але кометне чи метеоритне походження Тунгуського тіла досі переконливо не доведено. Також сьогодні не забута одна з гіпотез про ендегенну природу Тунгуського явища. Так, наприклад, розробляється версія про те, що Тунгуська катастрофа була ініційована газовим плюмом, що надійшов на поверхню Землі з нижньої мантії. Але жодна з цих гіпотез досі не була підкріплена достовірним і надійним фактичним матеріалом. Тому дискусії про Тунгуську подію не вщухають. Причина цього одна — не вирішено ключовий момент даної проблеми — не виявлені первинні фрагменти Тунгуського космічного тіла і тому не відомий істинний хімічний склад його речовини, повністю відсутні дані про його мінералогію. Маса Тунгуського тіла за різними оцінками вимірюється десятками, якщо не сотнями тисяч або навіть декількома мільйонами тонн. За будь-яких обставин (вибух тіла в атмосфері, розплавлення або випаровування тіла в атмосфері, зіткнення частин тіла в повітрі, зіткнення тіла з поверхнею землі) якась частина космічного тіла повинна була зберегтися в районі катастрофи в незміненому вигляді. Знахідка таких фрагментів цього тіла дозволить безальтернативно вирішити питання про його природу.

Наприкінці минулого десятиліття в російській пресі і на телебаченні вкотре широко обговорювалася природа Тунгуського явища 1908 р. Це було викликано не тільки 100-річним ювілеєм катастрофи, але і результатами недавніх досліджень італійськими вченими району катастрофи. В одній зі своїх публікацій вони намагаються довести метеоритне походження одного з озер в центрі Тунгуської катастрофи — озера Чеко. Піднімається питання про пошуки в цьому озері самої метеоритної речовини, яку за даними їх статті, а також авторів багатьох інших публікацій до цього часу в районі катастрофи не було знайдено.

У журналі "Світогляд" вже опубліковано декілька статей про Тунгуську катастрофу 1908 року (див. Світогляд, №6, 2008, і №4, 2012), в яких наведені різні гіпотези щодо природи цього неперевершеного для 20-го століття явища і врешті загадкового донині. Трохи менше 85 років десятки експедицій вже працювали на місці катастрофи і сотні дос-

лідників намагалися вивчити і розкрити таємницю століття. Про цю подію зроблено вже тисячі публікацій як в престижних наукових журналах світового рівня і в науково-популярних виданнях, так і висвітлено в різних засобах масової інформації. Майже сотня гіпотез, багато версій і здогадок про природу цієї катастрофи як з відповідним науковим підґрунтям, так і з безмежною фантазією. Автори книги [1] згрупували запропоновані за десятки років досліджень катастрофи різновиди гіпотез за такими напрямками (вибрані менш-більш ґрунтовні гіпотези катастрофи): *метеоритні* (28 гіпотез), *кометні* (11), *геофізичні* (10), *техногенні* (14), *"антиречовинні"* (8), *синтетичні* (3) ... А ще є космічні, релігійні і просто фантастичні версії ...

В більшості публікацій і гіпотез про Тунгуську подію 30 червня 1908 року стверджується, як от і в останній публікації "Світогляду" за 2012 рік, №4: "*Жодного міліграма речовини "метеориту" до цього часу не знайдено*" (стор. 4). Чому не знайдено і яка причина цього невезіння? Зовсім свіже падіння Чебаркульського метеориту на Уралі 15 лютого 2013 року наглядно продемонструвало нам у що може перетворитися навіть не дуже велике небесне тіло при швидкісному входженні в земну атмосферу — воно майже згоріло і розпалося на тисячі-мільйони частинок космічного пилу і у відносно рідкісні макроскопічні шматки. Сприятливі обставини (зима, сніговий покрив, видно місця порушення цього покриву ...) дозволили зібрати непоганий врожай уральського метеориту. А як було на Підкам'яній Тунгусці, в майже безлюдній тайзі? Перші безпосередні пошуки космічної речовини в районі Тунгуської катастрофи почалися не по свіжим слідам явища, а майже через 20 років, в квітні 1928 року експедицією *Л. Кулика*. Роком раніше, в березні 1927 року, Л. Кулик відвідав місце катастрофи і склав перші власні враження про її масштаб. Найвірогідніше, що Тунгуське космічне тіло також розпалося переважно на мікроскопічні частинки і знайти їх через десятки років стало надзвичайно важко. Можливо, саме в цьому криється проблема пошуків решток Тунгуського тіла.

І все таки мікроскопічні фрагменти Тунгуського космічного тіла були знайдені ще у 1978 році експедицією інституту геохімії і фізики мінералів АН УРСР під керівництвом *Е.В. Соботовича*. Результати досліджень цих фрагментів — так званих тунгуських "алмазів" — були висвітлені в ряді публікацій у 1979—1987 роках [2—8]. У 2009 році з'явилася стаття італійських дослідників [9] про можливу належність озера Чеко в районі Тунгуської катастрофи до метеоритного кратера. Ця та інші свіжі публікації на тунгуську тему, а також урочистості з відзначення сторіччя від дня катастрофи певним чином спонукали нас згадати про тунгуські "алмази". Тому у 2011 році ми повернулися до досліджень залишків фрагментів тунгуських зразків за допомогою новітнього обладнання в кращих лабораторіях світу (Helmholtz-Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences, GFZ, Germany; Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA; Brookhaven National Laboratory, Upton, USA). Завдяки такому співробітництву дослідників декількох країн було отримано важливі результати, які дозволяють сказати нове слово про найбільшу загадку минулого століття [10].

Геохімічні "космічні" ознаки

Оскільки великих фрагментів Тунгуського тіла не було знайдено, то багато дослідників намагаються відновити склад речовини тіла за допомогою геохімічних та ізотопних досліджень мікро- і наночастинок з району катастрофи: магнетитових, магнетитовіюститових, силікатних та перехідних за складом оксидно-силікатних мікросферул з проб ґрунту і торфу, наночастинок з смоли дерев, а також при вивченні проб самого торфу (таблиця 1). Мікросферули мають розміри від п'яти-десяти до декількох сотень мікрон, дуже рідкісні дещо більші виділення. Деяка їх частина збагачена Ni, Co, Cr та Ir, що свідчить про їх космічне походження. Хімічний склад багатьох сферул з певним відношенням Ni:Co вказує на те, що вихідною речовиною для таких елементів, як Fe, Ni і Co, могли бути такі метеоритні мінерали як камасит і

Таблиця 1. Індикатори космічної природи Тунгуського тіла

Матеріал ¹ та метод його вивчення	Результати вивчення, індикаторні ознаки	Запропонована природа Тунгуського тіла	Літературне джерело
Спектральний і мікрохімічний аналіз проб магнетитових сферул ² і уламкових металічних частинок ²	Металічні частинки мають склад, що характерний для метеоритного заліза (до 10.5 % нікелю і до 0.7 % кобальту), у магнетитових сферулах до 4% нікелю і до 0.3 % кобальту	Залізний метеорит	Явнель, 1957
Мікрохімічний аналіз на нікель і залізо середніх проб магнетитових сферул	Встановлено збагачення сферул нікелем. Відношення Ni:Fe: 11.0 і 4.0	Метеорит залізо-силікатного складу	Флоренский, 1963
Мікрохімічний і рентгеноспектральний аналізи магнетитових і силікатних сферул	Встановлено збагачення магнетитових сферул нікелем. В одній із сферул рентгенометрично діагностовано камасит	Комета	Флоренский и другие, 1968

Мікрозондовий аналіз окремих силікатних сферул	За складом сферили не мають аналогів серед відомих земних порід. Крім високого вмісту кремнезему (65.2—76.1) їм властиво високий вміст лугів, особливо натрію (11.3—14.2 Na ₂ O). Сферили походять з неземної речовини, виключається їх утворення при згорянні в атмосфері звичайного кам'яного метеорита	Космічне тіло	Долгов и др., 1973
Нейтронно-активаційний (НАА) і спектральний аналіз проб моху торфу	У торфі катастрофного року виявлені аномальні змісту Br, Zn, Pb, Hg, Na, Au, Mo, Re, Co та інших елементів. Склад цієї космічної речовини відмінний від складу звичайних метеоритів, але корелює зі складом комет	Комета	Golenetsky et al., 1977
НАА проб магнетитових сферул	У деяких пробах сферул встановлено Ni:Co співвідношення 20—24, характерне для метеоритної речовини і підвищений вміст іридію: 2.5, 9.4 і 56.9 ppm	Звичайна комета з кам'яними включеннями	Ganapathy, 1983
НАА проб магнетитових сферул і мікрозондовий аналіз окремих магнетитових сферул	Встановлено збагачення сферул нікелем і кобальтом. Середні значення Ni: Co для деяких проб сферул відповідає 20—24, вміст іридію — 5.3 ppm. Співвідношення Ni: Co і аномалія іридію викликана падінням космічного тіла	Космічне тіло	Nazarov et al., 1983
Мікрозондовий аналіз окремих магнетитових сферул	Встановлено збагачення сферул нікелем. Співвідношення Ni: Fe відповідає 5.18, 6.58, 6.78, 16.47 та 28.1	Комета з мікровключеннями вуглистих хондритів (типи C1-C2)	Zbik, 1984
Мікрозондовий аналіз мікрочастинок зі смоли гілок дерев	Збагачення смоли гілок 1908 року мікрочастинками, які складаються з Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn і іншими елементами, що значно перевищує фоновий рівень	Метеорит нормальної щільності	Longo et al, 1994
НАА проб торфу	Збагачення зразків торфу катастрофного року іридієм (0.24—0.54 ppb), а також підвищений вміст Ni і Co. Аномалія іридію викликана падінням космічного тіла	Комета	Hou et al, 1998
Мас-спектрометрія проб торфу	Зниження вмісту радіовуглецю в шарах торфу катастрофного року — присутність так званого мертвого вуглецю. Аномалія радіовуглецю викликана руйнуванням космічного тіла	Комета	Rasmussen et al., 1999
Мас-спектрометрія проб торфу	У торфі катастрофного року встановлені зсуви в ізотопному складі вуглецю $\delta^{13}\text{C}$ ($\Delta^{13}\text{C}$ до +4.3 ‰) і водню δD (ΔD до —22 ‰). Аномалія в ізотопному складі вуглецю і водню викликана падінням космічного тіла	Комета	Kolesnikov et al., 1999
Мас-спектрометрія проб торфу	Торф катастрофного року збагачений домішками Pd і Rh у 3—9 разів більше, ніж інші шари торфу. Аномалія елементів платинової групи викликана падінням Тунгуського космічного тіла	Комета чи метеорит (хондрит)	Hou et al, 2000]; Hou et al, 2004; Kolesnikov et al., 2005
Мас-спектрометрія проб торфу	У торфі катастрофного року встановлені зсуви в ізотопному складі вуглецю $\delta^{13}\text{C}$ ($\Delta^{13}\text{C}$ до +2.0 ‰) та азоту $\delta^{15}\text{N}$ ($\Delta^{15}\text{N}$ до +7.2 ‰). Аномалія в ізотопному складі вуглецю та азоту викликана падінням космічного тіла	Комета	Колесников и др., 2003
Дослідження морфології озера Чеко	Морфологія озера подібна морфології імпактних структур Землі. Озеро має імпактне походження внаслідок падіння метеорита	Метеорит	Gasparini et al, 2007

Радіометричні й ізотопно-геохімічні дослідження відкладів озера Чеко	Датування по ізотопах ^{137}Cs і ^{210}Pb відкладів озера свідчить про його приблизно 100-річний вік. Воно утворилася під час Тунгуського явища при падінні метеорита	Метеорит	Gasperini et al., 2009
Мікрозондовий аналіз окремих залізних і силікатних сферул ³	Силікатні частинки віднесені до мікрометеоритів, деякі з них містять олівін і металеві краплі. Залізні сферули складаються з Ni(Cr) — вмісних вюстити і магнетиту з багатими на нікель металевими включеннями	Метеорит (хондрит)	Бадюков та ін., 2011

Примітки: 1 — сферули з ґрунту і торфу. 2 — з проб відібраних Л.О. Куликом в 1927—1930 роках. 3 — з проб відібраних експедицією під керівництвом К.П. Флоренського на початку 1960 років.

теніт. Мінеральний склад сферул: переважаючі мінерали — магнетит, вюстит, рідше гематит, рідкісні мінерали — хроміт, камасит, олівін (форстерит), піроксен. Однак майже всі ці мінерали можуть належати до новоутворень, що виникли в результаті розплавлення космічного тіла і остигання розпорошеної речовини або в результаті випаровування речовини тіла і її конденсації. До того ж у багатьох випадках дуже важко довести зв'язок сферул саме з Тунгуським явищем. Особливо не ясне джерело силікатних сферул, якими збагачені катастрофні шари торфу.

Без сумніву, більшість сферул є результатом істотного перетворення первинної речовини космічного тіла, його хімічного і мінерального складу, і це не дає можливості точно відновити його справжній склад. Такий же висновок можна зробити щодо встановлених численних елементних та ізотопних аномалій в торфі і в кільцях дерев. Реконструкція і твердження про тип комети або метеориту багатьма дослідниками будується на припущеннях про те, що таке чи інше співвідношення встановлених елементів та їх ізотопів може дати космічне тіло того чи іншого складу. За таких реконструкцій буде позначатися місце відбору проб, кількість вивченого матеріалу, вид і якість досліджень, що в підсумку народжує найрізноманітніші версії про природу космічного тіла. При цьому, в більшості випадків не враховується та обставина, наскільки міг змінитися хімічний склад мікроскопічних частинок тіла під впливом високих температури і тиску під час вибуху, а також можливі зміни їх складу за час їх перебування на поверхні землі.

Попри все, нині простежується дві основні версії про природу Тунгуського тіла (комаета або метеорит хондритового складу), аргументами для яких служать встановлені геохімічні аномалії в районі катастрофи. Так, сильне збагачення торфу леткими елементами і варіації (зсув) в ізотопному складі вуглецю, азоту і водню пояснюються привнесенням кометної речовини. Підвищений вміст в торфі елементів платинової групи, Ni, Co, Cr і, особливо іридію, трактується хондритовим складом метеориту. Вважається, що відношення Ir/Co, Ir/Cr, Ir/Ni в торфі близькі таким як для вуглистих CI хондритів.

Безумовно *незаперечною важливою ознакою космічної природи Тунгуського явища є іридієва аномалія в районі катастрофи*, ознаки якої виявлені в мікро-

скопичних рештках цього космічного тіла — сферулах і в самому торфі — шарах катастрофного року. Вона не така потужна як слід було би очікувати, однак вона реальна. За даними багатьох дослідників вміст іридію в різній речовині з району катастрофи мінливий: в чорних магнетитових сферулах від 2,5 ppm до 56,9 ppm, в торфі від 0,24—0,54 ppb до 39,9 ppt, і навіть до 735 ppt. Приблизно такий же рівень вмісту іридію і в тунгуському "алмазі" — 0,16 ppm. Оскільки головним носієм іридію в метеоритах є нікелісте залізо, а з подальшого тексту буде видно, що його мало у тунгуських "алмазах", то це може бути поясненням таких концентрацій іридію на місці катастрофи.

Мінералогічні "космічні" ознаки

Нагадаємо, що ще в 1978—1979 роках знайдені експедицією інституту геохімії та фізики мінералів АН УРСР (м. Київ) в центрі Тунгуського явища, в торфі катастрофного року, тунгуські "алмази" були вивчені в цьому ж інституті з використанням сучасного на той час обладнання. Вони виявилися імпактними утвореннями по агрегатам графіту — алмаз-лонсдейліт-графітовими зростками з включеннями під питанням можливого троїліту. Тобто, вони є свідченням дуже потужного імпактного явища, і власне продуктом імпактогенезу. На думку більшості авторів, що вивчали в той час тунгуські "алмази" — ці мінерали можна віднести до метеоритного матеріалу. Проте, у 1985 році *Е.В. Соботович* зі співавторами [8] заперечив метеоритне походження вказаних зразків і відніс їх до земних імпактних утворень. Підставою для такого припущення послужив низький вміст іридію (0,16 ppm) та нібито "земний" вміст багатьох інших елементів, виявлених в одному із тунгуських зразків за даними нейтронно-активаційного аналізу. Однак такий вміст іридію у тунгуському зразку в десять раз більший його середнього вмісту в земних породах. На жаль, на мою думку, згаданою публікацією 1985 року було приглушено інтерес радянських дослідників катастрофи до відкриття тунгуських "алмазів". І, тому, звичайно, подібний матеріал ніхто не намагався шукати в тунгуських торфах. Для західних науковців до публікацій 2013 року [10, 11] це відкриття фактично було невідомим.

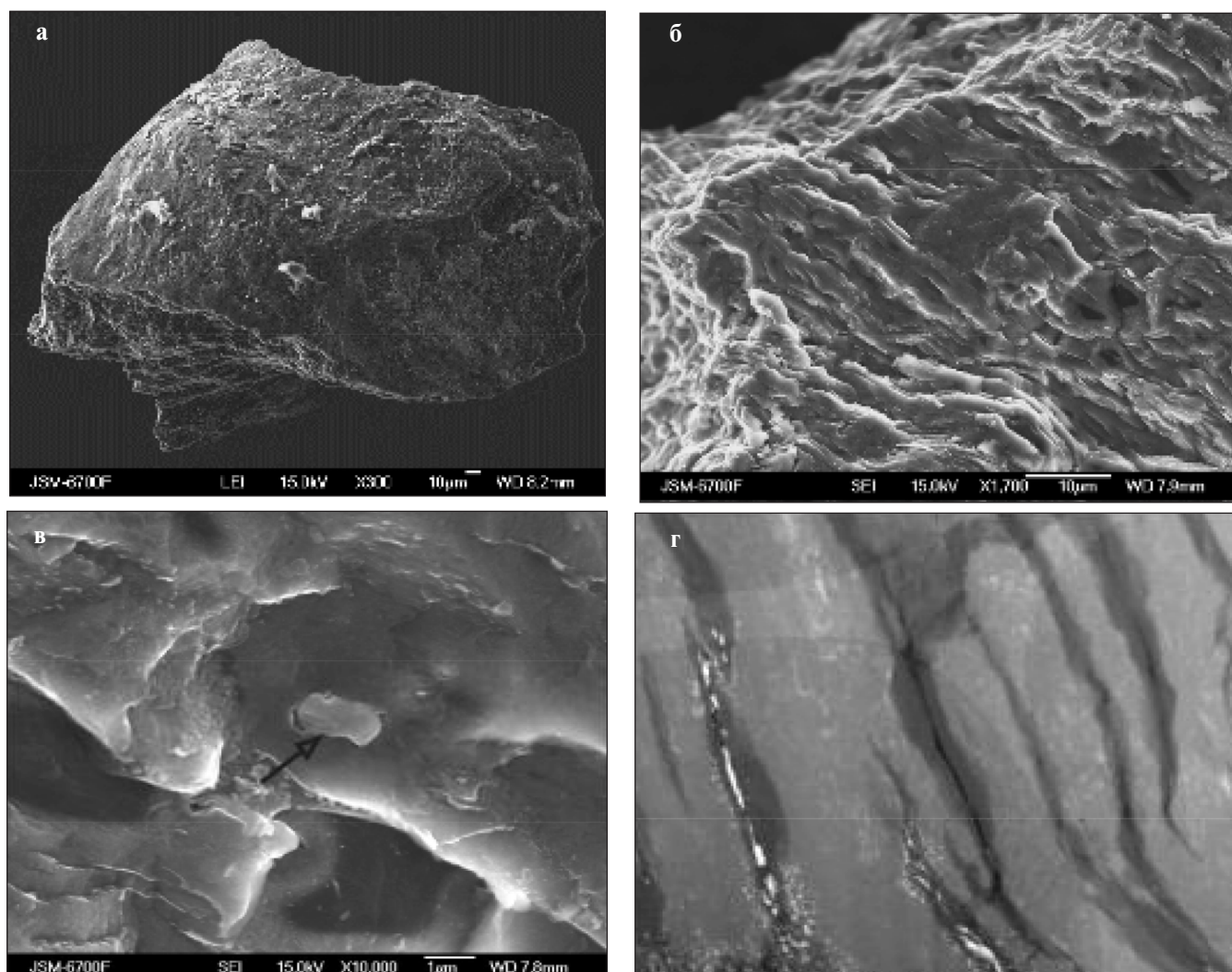


Рис. 1. Растрові (а—в) і трансмісійний (г) знімки Тунгуського алмаз-лонсдейлітового агрегату із залишками графіту [10]: а — нодулоподібне зерно, б — пластинчаста "графітова" будова зерна, в — включення кристалу троїліту у вуглецевій матриці зерна (показано стрілкою), г — вирізана із зерна плівка розмірами 15х10х0,2 мікрон зі слідами деформації вуглецевої матриці зерна та світлими включеннями у тріщинах і біля них кристалів троїліту, теніту, шрейберзиту і γ -заліза

Що показало вивчення залишків тунгуських "алмазів" у 2011–2012 роках в лабораторіях України, Німеччини і США на сучасному рівні? Переслідувалася головна мета — підтвердити наявність троїліту в зразках і знайти інші мінерали, характерні для метеоритної речовини, а також по можливості детально вивчити всі мінерали. Поєднанням растрової і нових методів трансмісійної електронної мікроскопії, іонної маспектрометрії (nanoSIMS) та рентгенівського синхротронного аналізу (X-ray synchrotrone technique) в цих зразках вперше встановлена асоціація високобаричних мінералів вуглецю разом з моносulfідом заліза — троїлітом (FeS), тенітом (Fe-Ni), γ -залізом і шрейберзитом ($(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$) та детально вивчено їхню структуру і склад [10]. Ця асоціація вказує одночасно на їх метеоритне й імпактне походження.

За зовнішнім виглядом зразки мають форму подібну до нодулів, які на 99,5% містять мінерали вуглецю — алмазу, лонсдейліту і графіту. Троїліт (до 0,5% за вмістом), теніт, γ -залізо і шрейберзит є мікро- і нановключеннями у вуглецевій матриці, які випов-

нюють зони деформації (тріщини) і пори (рис. 1). Вуглецеві "нодулі" несуть ознаки ударного метаморфізму: тріщини, розриви і зміщення, зони зминання і подрібнювання в матриці, деформації нано- і мікроскопічних зерен мінералів.

На макрорівні вуглецеві "нодулі" мають пластинчасту внутрішню будову. Вони складаються з апографітових пластин різної товщини з ознаками деформації шарів. На нанорівні кожна така пластинка є полікристалічним агрегатом, що складається з кристалітів алмазу, лонсдейліту і графіту.

За даними рентгенівських досліджень співвідношення фаз наступне: алмаз > лонсдейліт > графіт. Переважаючі розміри кристалітів: алмазу — 10–15 нм, лонсдейліту — 5–10 нм і графіту до 40 нм. Текстура алмаз-лонсдейліт-графітових агрегатів незавжди проявлена. Середній ізотопний склад вуглецю (алмаз-лонсдейліту) відповідає $\delta^{13}\text{C} = -15,6\text{‰}$. Алмаз і лонсдейліт є типовими апографітовими утвореннями, що виникли внаслідок високих ударних навантажень за мартенситним механізмом

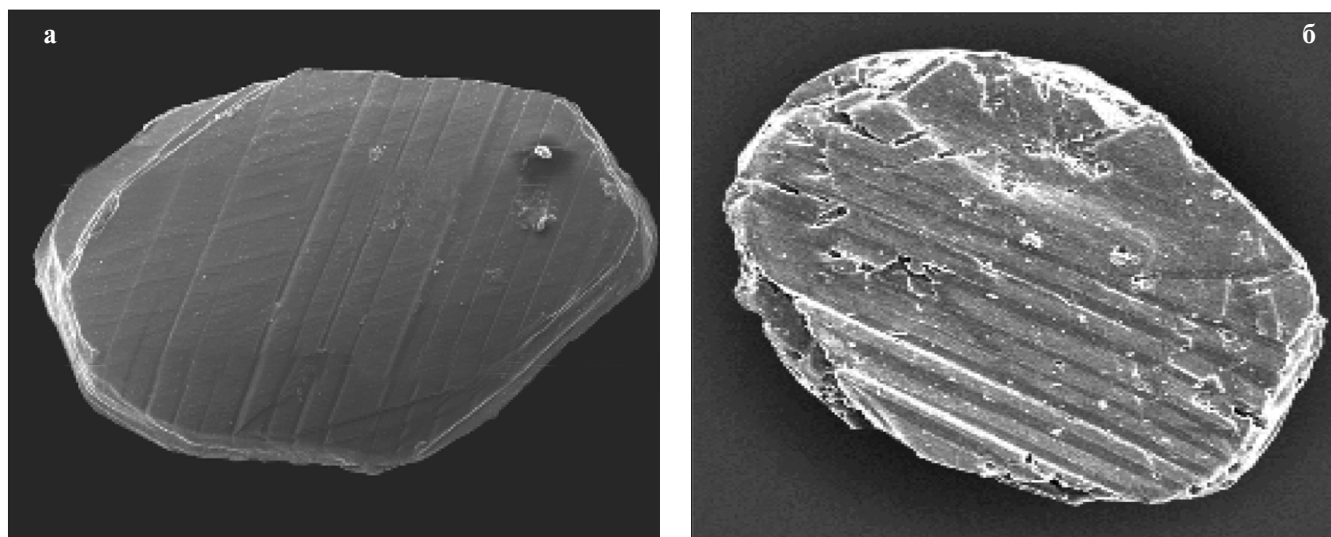


Рис. 2. Растрові знімки апографітових імпактних алмазів із земних астроблем (досконалі кристали складу алмаз>лонсдейліт>графіт): а — із Попігайського метеоритного кратеру (Сибір, Росія), б — із метеоритного кратеру Зелений Гай (Україна). Розміри кристалів: а — 0,5 мм, б — 0,2 мм

Троїліт, теніт, γ -залізо і шрейберзит належать до характерних метеоритних мінералів. Численні виділення троїліту мають різну форму: досконалі гексагональні пластинчасті кристали, недосконалі кристали, пластинки та плівки. Розміри виділень троїліту від 5—10 нм до 750 нм, рідше до десятків мкм. Хімічний склад виділень мінералу мінливий: від троїліту до піротину, середній склад відповідає троїліту. Основні домішки в мінералі: Cr — середній вміст 1.2% і Cu — середній вміст 3.2%. Теніт, γ -залізо і шрейберзит утворюють пластинчасті наночастинки і часто асоціюють з троїлітом. Хімічний склад виділень теніту (від 15.5% до 29.3% Ni) і шрейберзиту також мінливий.

Отже, у тунгуських зразках встановлена асоціація високобаричних мінералів вуглецю разом з троїлітом, нікелістим залізом — тенітом, γ -залізом і шрейберзитом. Всі чотири останні мінерали є лише включеннями у вуглецевій матриці. Майже аналогічна асоціація мінералів давно вивчена в деяких залізних метеоритах і в кам'яних — уреїлітах [10]. Алмаз і лонсдейліт цих метеоритів є продуктами імпактогенезу. Троїліт, шрейберзит, γ -залізо і, особливо, нікелісте залізо — теніт відносяться до типового набору власне метеоритних мінералів.

Як відомо, імпактний алмаз був вивчений в метеоритах раніше, ніж у земних породах, але протягом багатьох років він трактувався як продукт планетних надр. Нині доказано (в тому числі експериментально), що імпактний алмаз — це полікристалічні утворення із декількох фаз, який утворюється при надзвичайно високих ударних і статичних тисках внаслідок трансформації структури вуглецевої речовини в алмаз і/чи лонсдейліт, для природного імпактного алмазу — найчастіше при ударних перетвореннях графіту. На сьогодні його встановили у чотирьох залізних метеоритах (Canyon Diablo, ALHA 74-283, Magura і Chuckwalla) і в багатьох уреїлітах [10]. Як у залізних, так і в кам'яних метеоритах імпактний алмаз представлений композицією в різних пропорціях

нанокристалітів алмазу і лонсдейліту з незначною домішкою первинного чи вторинного графіту. У цих метеоритах він тісно асоціює з троїлітом, нікелістим залізом (камаситом, тенітом) і шрейберзитом. У 1987 році описано новий генетичний тип метеоритного алмазу — так званий колоїдний алмаз. Його нанокристали виявлені спочатку в вуглистих, а потім у звичайних і енстатитових хондритах.

Імпактний алмаз земних порід знайдено у багатьох метеоритних кратерах-астроблемах (у Росії, Україні, Німеччині, Фінляндії та ін). Цей алмаз також представлений композицією трьох фаз (алмаз, лонсдейліт, графіт) з перевагою за вмістом нанокристалітів алмазу і лонсдейліту. Серед земного імпактного алмазу встановлено два підтипи залежно від вихідного ударно-метаморфізованого вуглецевого матеріалу — апографітовий і аповугільний.

Оскільки тунгуські зразки є власне імпактними алмазами, зупинимось більш детально на особливостях цих незвичайних природних утворень із різних джерел (таблиця 2). Це дозволить приблизно визначити місце тунгуських зразків серед інших імпактних алмазів. Насамперед, імпактний алмаз із метеоритів і земних порід астроблем розрізняється за місцем утворення. Алмаз залізного метеориту Canyon Diablo і алмаз астроблем утворилися на Землі внаслідок ударного метаморфізму, викликаного падінням небесних тіл та їх зіткненням із земною поверхнею, алмаз інших залізних метеоритів і уреїлітів утворився внаслідок ударного метаморфізму в космосі при зіткненні метеоритів. Тоді як алмаз з хондритів виник внаслідок конденсаційного процесу в космосі.

Видно, що алмази із залізних, кам'яних метеоритів і порід астроблем мають деякі спільні особливості. Головні з них: багатофазність (наявність лонсдейліту), змінний склад мінеральних фаз і полікристалічна будова із різним ступенем дисперсності. Зі збільшенням ступеня кристалічності (вміст алмазу збільшується, а графіту зменшується) і спрощенням фазового

Таблиця 2.

Порівняльна характеристика алмаз-лонсдейліт-графітових зростків з метеоритів та імпактних порід метеоритних кратерів Землі

Ознака, властивість	Залізні метеорити	Уреїліти	Хондрити	Імпакти, апографітовий алмаз	Імпакти, аповугільний алмаз	Тунгуські зразки
Вміст зростків	Низький	Високий, до 1% (інколи більше)	Низький, найбільше у вуглих хондритах — до 500 ppm	Високий, в залежності від вмісту вихідного графіту в мішені	Високий	Рідкісна знахідка
Переважний розмір зростків	Менше 1мм в діаметрі, зрідка до 5 мм	Менше 1 мм	Одиниці нанометрів	Менше 0.5 мм, зрідка до 1см	0.1 — 0.5 мм	До 0.8 мм
Форма зростків	Ксеноморфна, псевдоморфози	Ксеноморфна	Ксеноморфна	Параморфози по кристалам графіту	Ксеноморфна	Ксеноморфна
Кристалічні форми	Деякі двофазні псевдоморфози є кубами і кубо-октаедрами	—	—	Прості форми кристалів графіту	—	—
Анатомія зростків	Характерна полікристалічна будова		Іноді до 5-10% мікрокристалів є двійниками	Характерна полікристалічна будова		
Вміст лонсдейліту	До 30%	Відсутній або до 10%	Прояви (?)	До 50 % і більше	Прояви	До 40 %
Розмір кристалітів, нм	Алмаз: 9.0—10.0; лонсдейліт — 5.0	Алмаз: 10—30 і більше	Алмаз: 0.4—6.8	Алмаз: 10—100; лонсдейліт — до 20	Алмаз: 0.1 — 10 мкм	Алмаз: 10—15; лонсдейліт — 5—10
Наявність текстури	Характерна	Рідкісні прояви	—	Характерна	Прояви	Прояви
^{13}C , ‰	—5.8 у алмазу; від —5.0 до —8.2 у графіту	—2; —5.7 і —10 у алмазу; від —1.0 до —10.0 у графіту	—30.8 і —38.0 і ще більше у алмазу; —15.0 у графіту	Від —10 до —22 як у графіту	Від —22.75 до —24.57 як у вугілля	—15,6
Елементи-домішки	N	N, He та інші інертні гази	N, H, He та інші інертні гази; Al, Si, Mg, F і Cl	N, Si, Al, Ca, Mn, Mg та інші домішки	H (більше 1.5 %), N (до 1 %), S, P, Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, Ni, Cr, V та інші	N
Вихідна вуглецева речовина	Графіт	Аморфний вуглець, графіт, наноалмаз	Газ	Графіт	Вугілля	Графіт
Механізм утворення алмазу і лонсдейліту	Мартенситний	Мартенситний	Конденсаційний	Мартенситний	Мартенситний і дифузійний	Мартенситний
Супутні мінерали	Графіт, троїліт, шрейберзит, когеніт	Графіт, троїліт, камасит	Графіт, муасаніт, шпінель	Імпактне скло, графіт, коесит, кварц	Імпактне скло, рідко графіт	Графіт, троїліт, теніт, γ-залізо, шрейберзит

Таблиця складена за літературними даними

складу зростає ступінь орієнтації кристалітів. Спостерігається поступовий перехід від зовсім безладного розташування частинок (ідеальний полікристал) до більш правильного. Це виражається в появі на рентгенограмі текстури.

Разом з тим спостерігаються суттєві відмінності імпактних алмазів з цих двох різних джерел: метеоритів і земних імпактитів. Щільні поліморфи із земних імпактитів успадковують і зберігають первинну форму кристалів графіту або її релікти (рис. 2). Їх поверхня часто має вельми характерні планарні деформаційні скульптури, проникаючі вглиб зерен. Морфологія, склад і властивості аповугільних алмазів також визначаються характером вихідного субстрату — вугілля. Ізотопний склад вуглецю апографітового і аповугільного алмазу майже аналогічний ізотопному складу вуглецю вихідної речовини відповідно. Такі ознаки дещо слабкіше виражені або зовсім відсутні в алмазах із залізних метеоритів і уреїлітів. Але особливо важливо те, що алмаз з метеоритів тісно асоціює з троїлітом, камаситом, тенітом, шрейберзитом та іншими Fe, Ni, Cг мінеральними фазами. Асоціації апографітового алмазу із астроблем інші і зумовлені складом земної породи, що зазнала ударного метаморфізму.

Специфічні ознаки має алмаз з хондритів. Він різко відрізняється від алмазу із залізних метеоритів, уреїлітів і земних імпактитів. Для нього не характерні морфолого-структурні ознаки утворення з графіту. Найдрібніші зерна такого алмазу мабуть є невід'ємною складовою частиною найбільш примітивної метеоритної речовини — тонкозернистої матриці хондритів.

Тунгуські зразки подібні до алмазонасних троїліт-графітових нодулів із залізних метеоритів і уреїлітів. Умови локалізації алмазу в цих метеоритах добре вивчені. Особливо близька ситуація з перебуванням алмазів в залізних метеоритах. Алмаз тут знаходиться в кавернозних троїліт-графітових нодулях розміром до декількох сантиметрів. Внутрішня частина нодулів складена тонкозернистою троїліт-графітовою матрицею. Окрім того, тунгуський алмаз також близький й за багатьма іншими ознаками (малі розміри кристалітів, значний вміст лонсдейліту, велика дефектність виділень, відносно близький ізотопний склад вуглецю) до алмазу із залізних метеоритів. Головне, що обидва вони кристалізувалися із структурно досконалого графіту. Тоді як алмаз з уреїлітів відрізняється великим розміром кристалітів, низьким вмістом лонсдейліту і меншою дефектністю. Як вже вище було сказано, видимою причиною цього може бути відмінність у вихідному вуглецевому матеріалі, що зазнав ударного перетворення. У разі уреїлітів — це вільний вуглець вуглистих хондритів (суміш переважно структурно недосконалого графіту і дуже тонкозернистого алмазу).

Відрізняються тунгуські алмаз-лонсдейліт-графітові зростки за багатьма ознаками і від земних наноалмазів (розміром не більше 10 нм), знайдених в різних геологічних ситуаціях на земній поверхні в оса-

дових породах. Цей алмаз морфологічно близький до алмазу з хондритів.

Апографітова матриця для алмазу і лонсдейліту в тунгуських зразках, характерна мікроморфологія поверхні (0001) їх апографітових пластин, місцями збережені закономірні взаємні орієнтаційні співвідношення нано- і мікрочастинок графіту, лонсдейліту і алмазу ((0001) графіту // (10⁻¹⁰) лонсдейліту // (111) алмазу) є ознаками утворення високобаричних фаз вуглецю в результаті мартенситного (когерентного) перетворення кристалів графіту в умовах високих ударних навантажень і температур. Сильно дефектний характер кристалітів фаз вуглецю і мінералів-включень вказують на те, що вони, мабуть, зазнали ще одні, більш пізні, ударні навантаження і високі температури. Можливо, це призвело до порушення порядку структурних взаємин фаз вуглецю.

Сказане вище дозволяє *відносити тунгуські зразки до незмінених на земній поверхні залишків речовини космічного тіла, яке вибухнуло в повітрі*. Більш конкретно сказати про місце утворення високобаричних фаз вуглецю в тунгуських зразках зараз важко. *Оскільки зіткнення Тунгуського космічного тіла з Землею не встановлено, то можна лише припустити, що ударне утворення алмаз-лонсдейліту сталося не на Землі, а в космосі чи в земній атмосфері*. Як вже було сказано, тунгуські алмазні "нодулі" несуть явні ознаки ударного метаморфізму: тріщини, зони зминання і дроблення, розриви і зміщення, деформації кристалічних ґраток мінералів, дислокації. До ознак більш пізнього метаморфізму можна віднести полікристалічну будову плівок троїліту, яке може вказувати на нагрів і перекристалізацію мінералу. До них, мабуть, відноситься і вторинна кристалізація нанокристалів графіту на поверхні "нодулей" під дією високих температур.

Судячи з місця локалізації більшості мінеральних включень (у тріщинах, площинах спайності графіту, порах або безпосередньо поблизу тріщин) в тунгуських зразках їх утворення ймовірно сталося в результаті імпрегнації розплаву в вуглецеву матрицю і його подальшої кристалізації при швидкому охолодженні. Але може бути, що ця метал-сульфід-фосфідна асоціація є продуктом конденсації пари перегрітих імпактних розплавів, які проникли по тріщинах, порах і площинах спайності (0001) у вуглецеві "нодулі". За складом ця асоціація мінералів близька до четверної евтектики (Fe, Ni, S, P) зі значним вмістом нікелю. Це видно з більшості аналізів складу нановключень, що свідчать про суміші фаз металу, сульфідів і фосфідів — про їх тонкі проростання. Кристалізація подібного парагенезису, наприклад, в залізному метеориті Cape York, потрапляє в інтервал температур 1475—700°C. Присутність Fe-Ni сплаву (стабільний при температурі 1400—920°C) і γ-Fe в тунгуських зразках також вказує на високі температури його кристалізації. Індикатором високого тиску є самі високобаричні фази вуглецю, зазначена вище евтектика і полікристалічний троїліт. Точні оцінки високих тисків і температур при утворенні тунгуських "алмазів" дати поки що неможливо.

Який все таки був метеорит? На це сьогодні точної відповіді немає. На наш погляд, крім включень мінералів, додатковим важливим аргументом приналежності вивчених тунгуських зразків до реліктів певного метеориту є вміст у їх вуглецевій матриці домішок Fe, Ni, Co і Ir. Високе співвідношення Ni:Co = 26, як і Fe:Ni = 22:1 свідчать більше на користь залізного метеорита, ніж уреїліту. Встановлений в тунгуському зразку вміст іридію — 0,16 ppm також не заперечує його метеоритний характер. Відомо багато типів метеоритів, в тому числі залізних (наприклад, октаедрити ПВ і ПВ з включеннями троїліту і шрейберзиту), з вмістом іридію не більш 0, 2 — 1 ppm.

Здавалося б, що наявність в тунгуських зразках включень певних мінералів мало б дещо обмежити число можливих генетичних типів метеоритів. Однак ці мінерали зустрічаються майже у всіх класах і типах метеоритів, в тому числі і в хондритах. Тому питання точного визначення генетичного типу метеорита для вивчених зразків все ж залишається відкритим.

Отже, вивчені тунгуські алмаз-лонсдейліт-графітові зростки можна віднести до мікрометеоритів, до реліктів первинного тіла метеориту. Вони можуть бути фрагментами залізного або залізо-кам'яного метеориту. Знахідка їх в шарах торфу катастрофного року дозволяє вважати їх рештками Тунгуського космічного тіла. Встановлена асоціація високобаричних поліморфів вуглецю, троїліту, теніту, γ -заліза і шрейберзиту є свідченням їх метеоритної природи. Алмаз і лонсдейліт мають імпульсне походження. Мабуть їхнє утворення відбулося при зіткненні тіл в космосі. Для додаткового підтвердження метеоритної природи і точного визначення типу метеориту необхідно провести ще ряд досліджень тунгуських зразків: вивчити ізотопне співвідношення гелію $^3\text{He}/^4\text{He}$, співвідношення ізотопів ксенону

$^{136}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ і $^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$, вмісту благородних газів, рідкоземельних елементів і більш детально встановити вміст елементів платинової групи.

Насамкінець, потрібно сказати декілька слів про одну із перших реакцій на нашу статтю в журналі "Planetary and Space Science" [10]. В коментарі [11] дослідника метеоритів **Ф. Бленда** із університету Curtin міста Перт, Австралія, висловлені певні сумніви щодо метеоритного походження тунгуських зразків та відповідного місця їх знахідки. Вони стосуються низького вмісту іридію та осмію в зразках і нібито не стовідсоткового доказу знахідки тунгуських зразків в шарах торфу саме катастрофного року. Мовляв, в кожен хвилину на поверхню Землі падає багато космічної речовини і знайдені тунгуські "алмази" можуть бути такою собі докатастрофною чи післякатастрофною космічною речовиною, тобто не мають відношення до Тунгуської катастрофи 1908 року. А низький вміст іридію в тунгуських зразках — це червоний прапор — застереження для висновку про їх метеоритного походження.

Спростування сумніву щодо низького вмісту іридію були наведені вище, повторимо їх декількома словами: є метеорити з різним вмістом іридію, зокрема із низьким, і саме катастрофний шар торфу, як і тунгуські "алмази" та інші рештки Тунгуського космічного тіла ним збагачені порівняно із нижче і вище залягаючими шарами торфу. До того ж рівень концентрації іридію в різних рештках тіла близький і дещо менший у торфі. Вище і нижче залягаючі шари торфу майже не містять іридію. Аргументи щодо відбору проб торфу саме із шарів катастрофного року, сама методика відбору проб і подальша їх обробка також наведені в наших публікаціях [7, 10]. ■

Література:

1. Войцеховский А.И., Ромейко В.А. Тунгусский метеорит. 100 лет великой загадке. — М.: Вече, 2008. — 432 с.
2. Квасница В.Н., Ковалюх Н.Н. Обыкновенные небесные алмазы // Химия и жизнь. — 1980, №8. — С. 72—73.
3. Квасница В.Н., Соболевич Э.В., Ковалюх Н.Н. Алмаз-графитовые сростки в торфах района Тунгусской катастрофы // В сб.: Научные методы прогнозирования поисков и оценки месторождений (материалы У Всесоюзного совещания по алмазам). — М.: Наука, 1980. — С. 57—58.
4. Квасница В.Н., Соболевич Э.В., Ковалюх Н.Н., Литвин А.Л., Рыбалко С.И., Шаркин О.П., Егорова Л.Н. Высокобарические полиморфы углерода в торфах района Тунгусской катастрофы // Докл. АН УССР, сер. Б. — 1979. — №12. — С. 1000—1004.
5. Квасница В.М., Ковалюх М.М. До розгадки таємниці Тунгуської катастрофи // Короткий астрономічний календар, 1988, вип. 34. — К.: Наук. думка, 1987. — С. 159—164.
6. Соболевич Э.В., Квасница В.Н., Ковалюх Н.Н. Новое свидетельство вещественности Тунгусского тела // Метеоритные и метеорные исследования. — Новосибирск: Наука, 1983. — С. 138—141.
7. Соболевич Э.В., Квасница В.Н., Ковалюх Н.Н., Литвин А.Л., Рыбалко С.И., Шаркин О.П. Радиоуглеродные и минералогические свидетельства вещественности Тунгусского тела // Минерал. журн.—1980. — т. 2, №1. — С. 36—46.
8. Соболевич Э.В., Пивень П.И., Колесов Г.М., Костюченко Н.Г., Кононенко Л.В., Ковалюх Н.Н. Распространенность некоторых элементов в алмаз-графитовом сростке и других объектах из эпицентра Тунгусской катастрофы // Метеоритика. — 1985, 44. — С. 135—138.
9. Gasperini L., Bonatti E., Albertazzi S., Forlani L., Accorsi C.A., Longo G., Ravaioli M., Alvisi F., Polonia A., Sacchetti F. Sediments from Lake Cheko (Siberia), a possible impact crater for the 1908 Tunguska Event // Terra Nova. — 2009. — v. 21. — P. 489—494.
10. Victor Kvasnytsya, Richard Wirth, Larissa Dobrzhietskaya, Jennifer Matzel, Benjamin Jacobsen, Ian Hutcheon, Ryan Tappero, Mykola Kovalyukh. New evidence of meteoritic origin of the Tunguska cosmic body // Planetary and Space Science, 2013, 2013. — V. 84. — P.131—140. May, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2013.05.003>
11. Mark Peplow. Rock samples suggest meteor caused Tunguska blast // Nature. News, 2013, Juny, <http://www.nature.com/news/rock-samples-suggest-meteor-caused-tunguska-blast-1.13163>