

УДК 549.01:523.68:524.57

## СУЧАСНІ ДАНІ ПРО СКЛАД І ПРИРОДУ ДОСОНЯЧНИХ ЗЕРЕН У МЕТЕОРИТАХ

Х. Погоржельська

*Інститут геохімії навколишнього середовища НАН та МНС України  
03142 м. Київ, просп. акад. Палладіна, 34а*

Досонячні зерна – це фактично частинки протопланетної чи протозоряної речовини розміром від нано- до мікрометрів, які в незначній кількості містяться в примітивних метеоритах і міжпланетних пилових частинках. Опрацьовано найновіші літературні дані про мінеральний та ізотопний склад досонячних зерен, їхні ймовірні джерела походження, розглянуто значення результатів досліджень для вирішення окремих проблем астрофізики.

*Ключові слова:* досонячні мінерали, ізотопні співвідношення, метеорити, AGB- та RGB-зорі, нові та наднові зорі.

Сьогодні в метеоритах виявлено понад десять досонячних мінералів, а саме: алмаз, карбід силіцію SiC, графіт, нітрид силіцію Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, корунд Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, шпінель MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, гібоніт CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, оксид титану TiO<sub>2</sub>, силікати, а також карбід титану TiC і нікелеве залізо у вигляді включень у досонячних зернах графіту [10].

Досонячні зерна конденсувались задовго до формування нашої Сонячної системи з газу, що покинув зорі внаслідок витікання або вибуху [22]. Від співвідношення C/O в ньому залежала природа конденсованого мінералу: якщо C/O < 1, то утворювались оксиди, силікати, якщо C/O ≥ 1 – самородний вуглець, карбіди, нітриди [11]. Далі вони потрапляли в міжзоряний простір і в кінцевому підсумку опинялися в газопиловій протосонячній туманності, у якій згодом розпочалось формування Сонця, Землі та інших планет [10]. Більшість досонячного пилу під час формування Сонячної системи випарувалася, однак незначна його частина, збережена всередині астероїдів, залишилась. Уламки астероїдів, що випали на Землю, тобто примітивні метеорити, і стали об'єктами досліджень досонячних зерен, виокремленню яких передувало дроблення метеоритів з наступним розчиненням їх у сильних кислотах [22].

На рис. 1 схематично показано шлях, який проходять досонячні зерна від початку утворення і до лабораторних досліджень.

Першими досонячними мінералами, які відкриті 1987 р. чиказькою групою дослідників (Ed Anders та ін.) як мінерали-носії благородних газів Ne та Xe, були алмаз і карбід силіцію [2]. Згодом з'ясували, що ці зерна мають також аномальні співвідношення ізотопів інших хімічних елементів, і це стало головним критерієм для ідентифікації досонячних мінералів. На рис. 2 зображено приклад двох стабільних ізотопів вуглецю (<sup>12</sup>C і <sup>13</sup>C). Як відомо, більшість ізотопів багатьох хімічних елементів утворена всередині зір унаслідок ядерного синтезу.



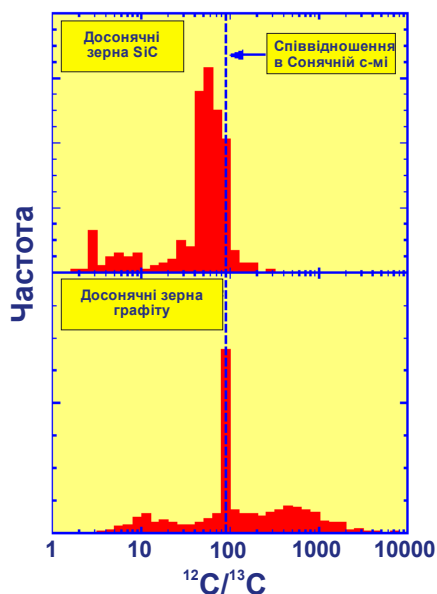
Рис. 1. Схематичне зображення шляху, який проходять досонячні зерна від початку утворення до лабораторних досліджень.

І хоч різні типи зір утворюють різні співвідношення ізотопів, матеріал з цих зір змішувався в просторі й під час формування Сонячної системи був практично повністю гомогенізований. Отже, значення  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  на Сонці, Землі та інших планетах становить приблизно 89. Правда, є деякі незначні варіації (88,7–90,2), спричинені фізичними й хімічними процесами, проте в цьому випадку їх не враховано.

Стосовно досонячних зерен, то вони містять первинні незмішані атоми хімічних елементів материнських зір, і тому співвідношення ізотопів у досонячних зернах значно відрізняються від ізотопних співвідношень у матеріалі Сонячної системи, вони можуть значно коливатися [20]. Як бачимо з рис. 2, на відміну від однакового значення  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  в усій Сонячній системі, ізотопні співвідношення вуглецю в досонячних зернах карбїду силіцію і графіту змінюються в діапазоні від 3 до 10 000(!), хоча для багатьох зерен цих мінералів значення  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  є в межах, характерних для речовини Сонячної системи. Тому для надійної ідентифікації досонячних зерен необхідно визначати ізотопні співвідношення всіх хімічних елементів мінералу – як головних, так і елементів-домішок (табл. 1). У табл. 1 також наведено, які саме методи застосовують для дослідження досонячних мінералів.

Виміряні ізотопні співвідношення хімічних елементів у досонячних зернах порівнюють з такими, що визначені астрономами для зір, або з такими, що передбачені теоретичними моделями, і так визначають, у якому саме типі зір сформувалися ті чи інші зерна. Джерелами більшості виявлених досонячних мінералів є наднові зорі й так звані AGB- і RGB-зорі (зорі-гіганти на завершальній стадії еволюції, коли вони втрачають велику кількість матеріалу) [10]. Однак це не єдино можливі джерела. З вуглистого хондриту *Мурчисон* ізольовано декілька зерен графіту та карбїду силіцію, які мають малі значення співвідношень  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  (4–9) і  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  (5–20) та великі –  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  (0,01–0,08). Такі значення ізотопних співвідношень свідчать про те, що материнським тілом цих досонячних зерен була нова зоря [1].

Рис. 2. Співвідношення  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  у досонячних зернах графіту та карбиду силіцію, а також у Сонячній системі, за [20].



Таблиця 1

Об'єкти та методи дослідження досонячних мінералів

Об'єкти досліджень	Методи досліджень*	Джерела даних
	Ізотопи легких елементів	
SiC: C, N, O, Al-Mg, Si, Ca, Ti, Fe	NanoSIMS	Hoppe et al., 1994; Huss et al., 1997; Amari et al., 2000
Графіт: C, N, O, Al-Mg, Si, Ca, Ti	Те ж	Amari et al., 1993; [6, 18]
Алмаз: C, N	MS	Russell et al., 1996
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> : C, N, Si	NanoSIMS	[17]
Оксиди: O, Al-Mg, (Ca, Ti)	Те ж	Nittler et al., 1997; Choi et al., 1998; [5, 7, 8]
Силікати: O, Al-Mg	—	[12, 13, 14]
	Благородні гази	
SiC: He, Ne, Ar, Kr, Xe	NGMS	Lewis et al., 1990, 1994
Графіт: Ne, Ar, Kr, Xe		Amari et al., 1995
	Кристалічна структура	
SiC	TEM, Raman	Virag et al., 1992; Bernatowich et al., 1992; Daulton et al., 2002, 2003
Графіт	Те ж	Zinner et al., 1995; Bernatowich et al., 1991, [3]; Croat et al., 2003
Алмаз	TEM, EELS	Bernatowich et al., 1990; Daulton et al., 1996
Розмір зерен, морфологія, елементний склад	SEM	Hoppe et al., 1994, [6]

\* NanoSIMS – нановторинна йонна мас-спектроскопія; MS – мас-спектроскопія; NGMS – мас-спектроскопія благородних газів; TEM – трансмісійна електронна мікроскопія; Raman – раманівська спектроскопія; EELS – спектроскопія характеристичних втрат енергії електронами; SEM – сканувальна електронна мікроскопія.

У табл. 2 наведено розмір та можливі джерела походження всіх ідентифікованих сьогодні досонячних мінералів.

Таблиця 2

## Ідентифіковані досонячні мінерали та деякі їхні характеристики

Мінерал	Розмір	Можливі джерела походження*	Джерела даних
Алмаз	2 нм	AGB	[23]
SiC	0,1–20 мкм	AGB, наднова зоря, нова зоря	Bernatowicz et al., 1987; Tang, Anders, 1988
Графіт	1–20 мкм		Amari et al., 1990, [1]
Карбіди в графіті	10–200 нм	AGB, наднова зоря	Bernatowicz et al., 1991, [3]; Croat et al., 2003
Ni-залізо в графіті	10–20 нм	Наднова зоря	Croat et al., 2003
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,3–1,0 мкм		[17]
Корунд	0,2–3,0 мкм	RGB, AGB, наднова зоря	[8]; Nittler et al., 1994
Шпінель MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,2–3,0 мкм		Nittler et al., 1997; Choi et al., 1998
Гібоніт CaAl <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	0,2–3,0 мкм		[5]
TiO <sub>2</sub>	0,2–3,0 мкм		[15]
Силікати (олівін, піроксен)	0,1–0,3 мкм		[12] (у міжпланетних пилових частинках); [14] (у хондритах)

\*AGB – Asymptotic Giant Branch; RGB – Red Giant Branch.

Першим визначеним у метеоритах досонячним мінералом є алмаз, та незважаючи на це, він найменше вивчений, оскільки зерна його надто малі для досліджень (у середньому 2 нм). Досонячні алмази ідентифікують за незвичайними ізотопними співвідношеннями елементів-домішок N та Xe [23].

Найліпше вивчений досонячний мінерал – карбід силіцію, оскільки процедура його вилучення з метеориту за допомогою хімічного травлення порівняно легка. Проте внаслідок травлення руйнується первинна будова зерен [10], і вони набувають так званого кородованого вигляду (рис. 3,а).

Зазначимо, що Т. Бернатович, не застосовуючи хімічних методів вилучення зерен, досліджував увесь наявний матеріал тонкозернистої матриці метеориту *Мурчисон* під електронно-сканувальним мікроскопом і діагностував 81 зерно карбіду силіцію з практично гладкою поверхнею (див. рис. 3,б), вважаючи таку будову цього мінералу первинною [4].

Окрім головних хімічних елементів C і Si, зерна карбіду силіцію містять значну кількість N, Al і Ti. На підставі ізотопного складу C, N і Si та кількості радіогенного Mg, який утворився внаслідок розпаду Al, зерна карбіду силіцію розділено на п'ять підтипів: головний підтип та X, Y, Z і A+B підтипи [10]. У табл. 3 наведено характерні для кожного підтипу ізотопні співвідношення, а також можливі джерела походження.

Дуже схожими на карбід силіцію підтипу X за розміром, зовнішнім виглядом, ізотопними співвідношеннями та зоряним джерелом є зерна *нітриду силіцію*, проте вони різко відмінні за кількістю. Сьогодні ідентифіковано до десяти таких зерен [17].

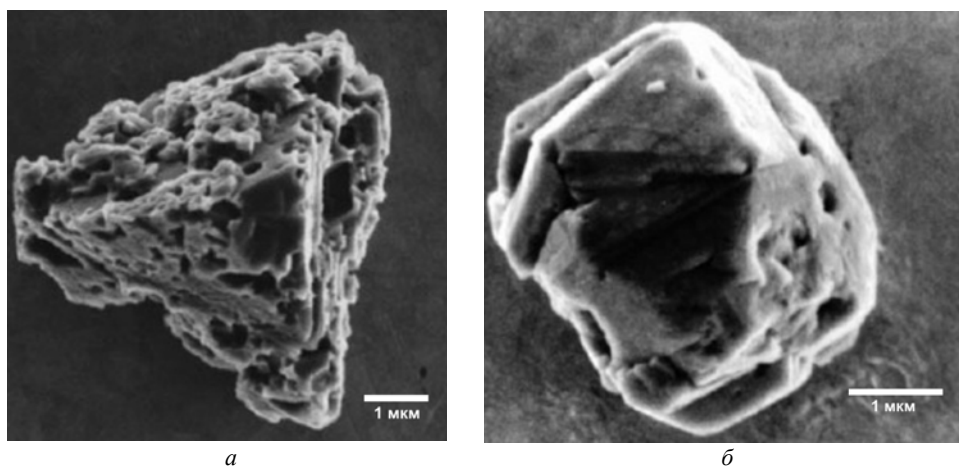


Рис. 3. Поверхня зерен карбиду силіцію під сканувальним електронним мікроскопом: *a* – “кородована”; *б* – гладка, за [10].

Таблиця 3

## Деякі характеристики підтипів SiC\*

Характеристики	Головний підтип	X	Y	Z	A+B
Співвідношення, %	87–94	1	1–2	0–3	2–5
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	10–100	20–7000	140–260	8–180	<3,5 (A) 3,5–10 (B)
$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$	50–20 000	10–180	400–5 000	1 100–19 000	40–12 000
$^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$	0,048–0,060	Багатий на $^{28}\text{Si}$	0,048–0,058	0,0507	0,06
$^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$	0,031–0,037	Багатий на $^{28}\text{Si}$	Багатий на $^{30}\text{Si}$	Багатий на $^{30}\text{Si}$	0,037
$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$	0,001–0,0001	0,02–0,60			<0,06
Можливе джерело походження	AGB	Наднава зоря	Нова зоря	Нова зоря	Невідоме

\*За даними Hoppe, Ott, 1997; Hoppe, Zinner, 2000; Nittler, Hoppe, 2004a, b; Ott, 2003; Zinner, 1998; Lodders, Amari, 2005; [1, 10].

Практично всі дослідження досонячного графіту виконують на розділених за густиною чотирьох фракціях, вилучених з хондриту *Мурчисон*, – KF1, KF3, KFA1, KFB1, KFC1 (табл. 4). Є два морфологічні різновиди досонячного графіту. Для фракцій з високою густиною характерний графіт так званого цибулькового типу, складений з концентричних шарів графітового матеріалу (рис. 4,*a*), а для фракції з низькою густиною – графіт зі структурою “цвітної капусти” [3], яка утворюється завдяки злипанню дрібних зерен (див. рис. 4,*б*).

У зернах графіту з фракцій KF3 та KFC1 ідентифіковані включення досонячного нікелевого заліза та карбиду титану розміром від 10 до 400 нм (рис. 5). Відсутність ознак закономірного зростання включень та мінералу-господаря свідчить про рані-

ше формування мінералів-включень та їхнє випадкове захоплення графітом під час його росту. У випадку, якщо включення розташоване в центрі зерна графіту, то вважають, що воно могло слугувати центром зародження досонячного графіту [9].

Таблиця 4

Деякі характеристики графіту чотирьох досліджуваних фракцій\*

Характеристики	KF1, KF3	KFA1	KFB1	KFC1
Густина, г/см <sup>3</sup>	1,60–2,05	2,05–2,10	2,10–2,15	2,15–2,20
Морфологія	Переважає тип “цвітної капусти”			Переважає цибульковий тип
<sup>12</sup> C/ <sup>13</sup> C	3,6–7 223,0	3,0–21,46	3,8–3 377,0	2,1–4 064,0
<sup>14</sup> N/ <sup>15</sup> N	28–306	123–398	153–315	Головно сонячне
<sup>18</sup> O/ <sup>16</sup> O	До 0,375	До 0,013	До ~0,00204	
<sup>29</sup> Si/ <sup>28</sup> Si	0,032–0,116	0,027–0,079	±0,0507	
<sup>30</sup> Si/ <sup>28</sup> Si	0,064–0,890	0,013–0,046	±0,033	
<sup>26</sup> Al/ <sup>27</sup> Al	До 0,146	До 0,138	До 0,086	

\*За даними Норре et al., 2001a, b; Amari et al., 1994; [10, 18].

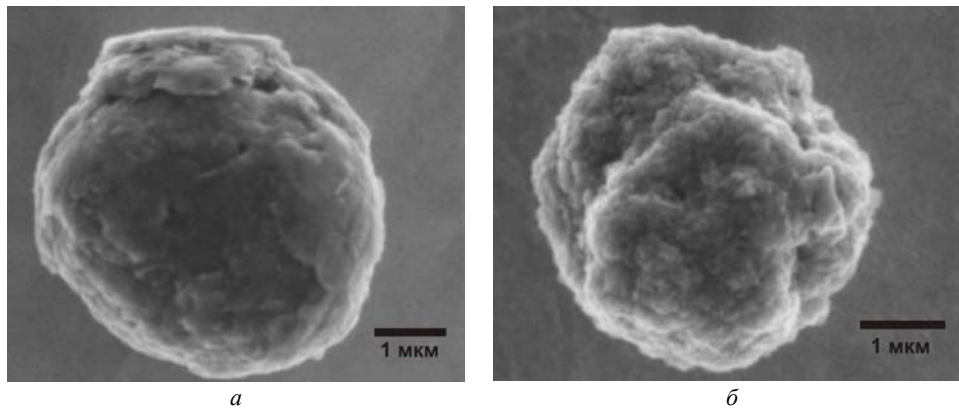


Рис. 4. Досонячні зерна графіту під сканувальним електронним мікроскопом: а – зі структурою цибулькового типу; б – зі структурою типу “цвітної капусти”, за [10].

З класу оксидів найчисленнішими досонячними мінералами є *корунд* і *шпінель* [7, 8], крім того, виявлено декілька зерен *гібоніту* [5] і тільки одне зерно *оксиду титану* [15]. Ізотопні співвідношення в більшості зерен оксидів засвідчують їхнє утворення на AGB- та RGB-зорях та значно рідше – на надновій зорі.

Досонячні *силікати* не є поширеними з двох причин: по-перше, вони, порівняно з оксидами та вуглецевісними зернами, чутливіші до процесів метаморфізму, по-друге, їх важко вилучити з метеоритів, які практично повністю складені силікатами з Сонячної системи [10]. Усього нині ідентифіковано 21 силікатне досонячне зерно: шість зерен (олівін та аморфні силікати) діаметром 0,3–0,9 мкм у міжпланетних пилових частинках [12], дев'ять зерен (піроксен, олівін та багаті на Al силікати) розміром 0,2–0,6 мкм у хондриті *Акфер 094* [14] та шість зерен у метеориті *NWA530* [13].

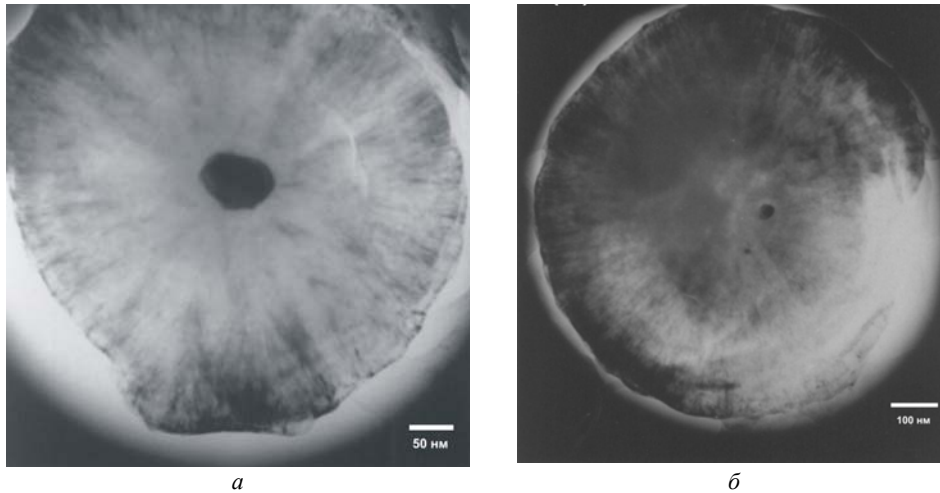


Рис. 5. Включення в досонячному графіті під трансмісійним електронним мікроскопом: *a* – нікелевого заліза; *б* – карбіду титану з домішками Ru, Zr і Mo, за [3].

Субмікронні досонячні зерна містять цінну інформацію про масштабні події та процеси поза межами Сонячної системи. Наприклад, дослідження досонячних зерен, утворених із залишку наднових зір, а саме – зерен графіту з низькою густиною, зерен карбіду силіцію підтипу X та зерен нітриду силіцію, дали цікаві з цього погляду результати. Доказом їхнього походження з наднової зорі є наявність у цих зернах  $^{44}\text{Ti}$  вже під час їхнього формування. Цей нуклід утворюється тільки в наднових зорях, він є радіоактивним з періодом піврозпаду 60 років. Про його попередню наявність у досонячних зернах свідчить значний надлишок дочірнього ізотопу  $^{44}\text{Ca}$ . Також зерна із залишку наднової зорі мають надлишки  $^{28}\text{Si}$  і  $^{18}\text{O}$  та високі значення  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ , які виведені з надлишку продукту розпаду короткоживучого  $^{26}\text{Al}$ – $^{26}\text{Mg}$ . Перед спалахом наднова зоря має структуру цибулькового типу, тобто складена з різних шарів, представлених найчисленнішими хімічними елементами (рис. 6).

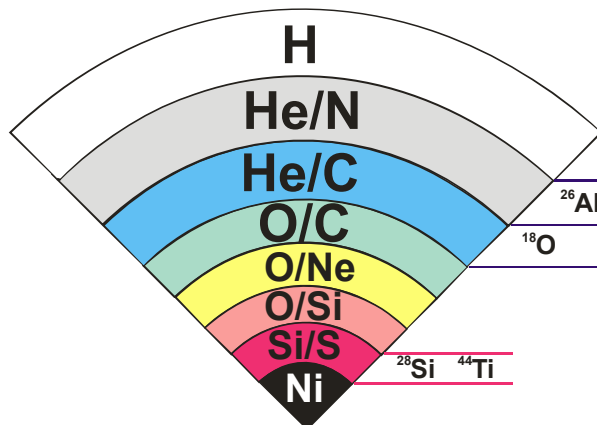


Рис. 6. Схематичне зображення структури наднової зорі до її спалаху, за [19].

Як  $^{44}\text{Ti}$ , так і  $^{28}\text{Si}$  утворені у внутрішній зоні, що складена, головню,  $^{28}\text{Si}$  та  $^{32}\text{S}$ . На противагу їм,  $^{18}\text{O}$  та  $^{26}\text{Al}$  можуть утворюватись у двох зовнішніх шарах зорі. Отже, наявність в одному й тому ж зерні ізотопів, що утворюються в різних шарах наднових зір, засвідчує турбулентне змішування речовини під час спалаху наднової зорі [19].

Отже, дослідження досонячних мінералів дає змогу нині або в перспективі вирішити низку астрофізичних проблем, зокрема, оцінити зоряну еволюцію та ядерний синтез (з'ясувати походження та природу змішування речовини зір, визначити обмеження щодо фізичних умов змішування, наприклад, температури, швидкості змішування) [16], хімічну еволюцію Галактики (за ізотопним складом Si, Ti та O в багатьох досонячних зернах), вік Галактики, формування навколосоряного пилу та хімічні умови ранньої стадії формування Сонячної системи [21].

1. *Amari S., Gao X., Nittler L.R.* et al. Presolar grains from novae // *Astrophys. J.* 2001. Vol. 551. P. 1065–1072.
2. *Anders E.* Local and exotic components of primitive meteorites, and their origin // *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1987. A 323. P. 287–304.
3. *Bernatowicz T.J., Cowsik R., Gibbons P.C.* et al. Constraints on stellar grain formation from presolar graphite in the Murchison meteorite // *Astrophys. J.* 1996. Vol. 472. P. 760–782.
4. *Bernatowicz T.J., Messenger S., Pravdivtseva O.* et al. Pristine presolar silicon carbide // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2003. Vol. 67. P. 4679–4691.
5. *Choi B.G., Wasserburg G.J., Huss G.R.* Circumstellar hibonite and corundum and nucleosynthesis in asymptotic giant branch stars // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 522. P. L133–L136.
6. *Hoppe P., Amari S., Zinner E., Lewis R.S.* Isotopic compositions of C, N, O, Mg, and Si, trace element abundances, and morphologies of single circumstellar graphite grains in four density fractions from the Murchison meteorite // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59. P. 4029–4056.
7. *Huss G.R., Fahey A.J., Gallino R., Wasserburg G.J.* Oxygen isotopes in circumstellar  $\text{Al}_2\text{O}_3$  grains from meteorites and stellar nucleosynthesis // *Astrophys. J.* 1994. Vol. 430. P. L81–L84.
8. *Hutcheon I.D., Huss G.R., Fahey A.J., Wasserburg G.J.* Extreme  $^{26}\text{Mg}$  and  $^{17}\text{O}$  enrichments in an Orgueil corundum: identification of a presolar oxide grain // *Astrophys. J.* 1994. Vol. 425. P. L97–L100.
9. *Lodders K.* They came from the deep in the supernova: The origin of TiC and metal subgrains in presolar graphite grains // *Astrophys. J.* 2006. Vol. 647. P. L37–L40.
10. *Lodders K., Amari S.* Presolar grains from meteorites: Remnants from the early times of the solar system // *Chemie der Erde.* 2005. Bd. 65. S. 93–166.
11. *Lodders K., Fegley B.* The origin of circumstellar silicon carbide grains found in meteorites // *Meteoritics.* 1995. Vol. 30. P. 661–678.
12. *Messenger S., Keller L.P., Stadermann F.J.* et al. Samples of stars beyond the solar system: silicate grains in interplanetary dust // *Science.* 2003. Vol. 300. P. 105–108.
13. *Nagashima K., Krot A.N., Yurimoto H.* Stardust silicates from primitive meteorites // *Nature.* 2004. Vol. 428. P. 921–924.



14. *Nguyen A.N., Zinner E.* Discovery of ancient silicate stardust in a meteorite // *Science*. 2004. Vol. 303. P. 1496–1499.
15. *Nittler L.R., Alexander C.M.O'D.* Automatic identification of presolar Al- and Ti-rich oxide grains from ordinary chondrites // *Lunar Planet. Sci.* 1999. Vol. 30 (Abstr. #2041).
16. *Nittler L.R., Alexander C.M.O'D.* Presolar grains: Outlook and opportunities for astrophysics // *Highlights of Astronomy*. 2006. Vol. 14. P. 17–20.
17. *Nittler L.R., Hoppe P., Alexander C.M.O'D.* et al. Silicon nitride from supernovae // *Astrophys. J.* 1995. Vol. 453. P. L25–L28.
18. *Travaglio C., Gallino R., Amari S.* et al. Low-density graphite grains and mixing in type II supernovae // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 510. P. 325–354.
19. <http://presolar.wustl.edu/work/grains.html>
20. [www.dtm.ciw.edu/lrn/psg\\_ident.html](http://www.dtm.ciw.edu/lrn/psg_ident.html)
21. [www.dtm.ciw.edu/lrn/psginfo.html](http://www.dtm.ciw.edu/lrn/psginfo.html)
22. [www.dtm.ciw.edu/lrn/psg\\_intro.html](http://www.dtm.ciw.edu/lrn/psg_intro.html)
23. [www.dtm.ciw.edu/lrn/psgtypes.html](http://www.dtm.ciw.edu/lrn/psgtypes.html)

## MODERN INFORMATION ABOUT COMPOSITION AND NATURE OF PRESOLAR GRAINS IN METEORITES

**H. Pohorzelska**

*Institute of Geochemistry of Environment of NASU  
Acad. Palladin Av. 34a, UA – 03680 Kyiv, Ukraine*

Presolar grains are literally bits of stars in size from nano-up to micrometers which in small amount are present at primitive meteorites and interplanetary dust parts. This article is the overview of published data on mineral and isotopic compositions of presolar grains and their stellar sources. Besides, the astrophysical significance of results of their research is considered.

*Key words:* presolar minerals, isotopic correlations, meteorites, AGB- and RGB-stars, new and supernew stars.

Стаття надійшла до редколегії 19.09.2008  
Прийнята до друку 30.10.2008