

## О солнечном происхождении популяции наноалмаза в хондритах

Г. К. Устинова

*Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН*

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

Аномальный ксенон, обогащенный как легкими, так и тяжелыми изотопами, т.е. *Xe-HL*, наблюдается в высокотемпературной фракции ксенона в реликтовых зернах наноалмаза хондритов, тогда как для ксенона низкотемпературной фракции, т.е. *Xe-P<sub>3</sub>*, характерен нормальный изотопный состав. Указан реальный процесс и определены закономерности формирования изотопных соотношений аномальной компоненты *Xe-HL* в досолнечных зернах наноалмаза. Показано, что эта компонента должна была формироваться и захватываться одновременно с синтезом наноалмаза в условиях распространения взрывных ударных волн от вспышек сверхновых. Существенно, что при прохождении ударных волн синтез алмаза и его обогащение аномальным *Xe-HL* возможны и в экстремальных *PT*- условиях области предфронта волны, и путем нуклеации в области разрежения за фронтом волны, и при облучении углеродистых зерен частицами высоких энергий. Изотопный состав *Xe-HL* является следствием усиления жесткости спектра радиоактивных частиц и его обогащения тяжелыми ионами при ускорении в ударных волнах. Приведены основания в пользу происхождения наблюдаемой в хондритах популяции наноалмаза при вспышке последней сверхновой перед формированием Солнечной системы, которая, по-видимому, была углеродно-детонационной сверхновой *SnIa*. Это свидетельствует в пользу появившихся новых гипотез, что популяция наноалмаза в хондритах, в основном, не является досолнечной.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** метеоритный алмаз; аномальный ксенон; реакции расщепления; ударные волны; вспышка сверхновой *SnIa*

**Ссылка:** Устинова Г. К. (2010), О солнечном происхождении популяции наноалмаза в хондритах, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6029, doi:10.2205/2010NZ000047, 2010

## Досолнечные реликты

Основу протосолнечного вещества составляло вещество гигантского газопылевого облака, которое за ~ 10 млн. лет своего существования до коллапса в протосолнце равномерно перемешалось сверхзвуковой турбулентностью с продуктами нуклеосинтеза около десятка сверхновых. Превращение газопылевого облака в звезду сопровождается гигантскими изменениями физического состояния вещества – его плотность возрастает на 20 порядков, а температура – на шесть порядков, так что вещество претерпевает серию трансформаций от молекулярного и твердого состояний до состояния сверхплотной релятивистской плазмы [Фортон, 2009]. В ранних конденсационных моделях, предполагалось, что энергии гравитационного коллапса было достаточно для испарения всей досолнечной пыли, которая затем переконденсировалась при равновесных условиях в аккреционном диске, приведя к изотопной и химической гомогенизации протопланетного облака. Однако открытие многочисленных изотопных аномалий в метеоритах заставило отказаться от концепции гомогенности протопланетного облака. Действительно, моделирование и анализ возможных процессов на ранней стадии Солнечной системы приводит к выводу, что протопланетное облако по своим физико-химическим условиям не было однородным [Дорофеева и Макалкин, 2004]. Например, из-за радиального градиента тепловой и лучистой энергии испарение досолнечной пыли не было полным и равномерным на разных расстояниях от протосолнца. Естественно, что зерна досолнечной пыли не представительны для валового состава протосолнечного облака. Их содержание в примитивных хондритах крайне мало: наиболее распространенные зерна досолнечного алмаза составляют ~1400 мкг/г, карбида кремния (SiC) ~14 мкг/г, графита ~10 мкг/г, шпинели (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ~1 мкг/г, корунда (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0.05 мкг/г, нитрида кремния (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) >0.004 мкг/г [Huss, 2004]. Предположение досолнечной природы этих зерен основывается на характерных изотопных аномалиях, обусловленных особенностями изотопных составов их звездных источников. Тем не менее, о

происхождении наиболее распространенных в хондритах зернах досолнечного алмаза с характерными изотопными аномалиями благородных газов, которые были или захвачены ими в процессе образования и роста, или имплантированы в них позднее [Lewis et al., 1989; Koscheev et al., 2001], до сих пор нет единого мнения [Bernatowicz et al., 2006].

### Наноалмаз в хондритах

Медианное значение размеров метеоритного алмаза  $\sim 3$  нм, что в 10-1000 раз меньше других межзвездных частиц. Такие мельчайшие зерна наноалмаза могли образоваться при неравновесной конденсации в холодных атмосферах звезд или в экстремальных *PT*-условиях переработки вещества ударными волнами при вспышках сверхновых [Lewis et al., 1989; Koscheev et al., 2001]. Существенно, что распределение алмазных зерен по размерам является не степенным, а логнормальным, что свидетельствует скорее об их росте, а не фрагментации, а также о коротком времени пребывания в межзвездной среде. [Huss, 2004]. Для метеоритного алмаза характерно высокое содержание водорода и обогащенность дейтерием [Braatz et al., 2000], что может указывать на его происхождение в области богатой водородом, где зерна наноалмаза могли быть более стабильными, чем графит. Однако, нанометровый размер метеоритного алмаза не позволяет исследовать индивидуальные зерна и получать информацию о механизме их образования (все изотопные данные по метеоритным наноалмазам основаны на анализе элементов и газов, экстрагированных из миллиардов индивидуальных зерен [Bernatowicz et al., 2006].

С другой стороны, лабораторные эксперименты по синтезу искусственного наноалмаза демонстрируют крайне широкий спектр физико-химических условий (возможных сочетаний температур, давлений и исходного вещества) для осуществления этого процесса. Действительно, искусственные наноалмазы получены как в процессах детонационного синтеза при высоких давлениях и температурах (ультрадисперсный наноалмаз, или UDD), так и методом химического парового отложения атомов углерода при низких давлениях и умеренных температурах (CVD-процесс, который используется для эпитаксиального роста ультра нанокристаллических алмазных пленок, или UNCD), а также при облучении углеродистых материалов лазером, интенсивным ультрафиолетовым излучением (УФ) и потоками частиц высоких энергий [Shenderova et al., 2002]. Изучалась относительная стабильность наноалмазов в зависимости от их размеров и гидрогенизации поверхности [Raty and Galli, 2005]. Показано, что при уменьшении размера алмаза до  $\sim 3$  нм, кристаллу энергетически более выгодно иметь обнаженную, а не гидрогенизированную поверхность. Именно такая неспособность поверхности удерживать водород приводит к прекращению дальнейшего роста кристаллов. В то же время известна каталитическая активность металлов, стимулирующая рост алмазных наночастиц при низких энергиях [Zavodinsky, 2005]. Аналогично атомам водорода они насыщают и стабилизируют свободные внешние углеродные  $sp^3$ -связи. Однако связь атомов металлов с углеродом гораздо слабее, чем связь водорода с углеродом, поэтому дополнительные атомы углерода легко замещают атомы металлов, что обеспечивает рост алмазных наночастиц даже при низких температурах.

Зерна детонационных наноалмазов и наноалмазов, генерированных в CVD-процессе, различаются своей микроструктурой. Для наноалмазов, синтезированных в ударных процессах, характерна градиентная микроструктура, обусловленная геометрией ударного фронта и направлением градиента давления, а также наличие дислокаций и других нарушений, тогда как микроструктура наноалмазов, конденсированных в CVD-процессе, демонстрирует изотропный рост, характерный для прямой нуклеации и гомоэпитаксиального роста из локально однородного пересыщенного газа. Общей же особенностью практически всех наноалмазов является наличие алмазного центра и графитоподобной оболочки [Daulton, 2005]. Изучение микроструктуры метеоритных наноалмазов свидетельствует о том, что большинство из них было конденсировано при низких давлениях в CVD-процессе. Предполагается возможность конденсации наноалмазов в зонах разрежения за фронтом ударных волн: испарение фракции углеродистого вещества при нагревании в ударном событии пересыщает частично ионизованный газ углеродом; при благоприятных условиях газ может конденсироваться за ударным фронтом, вызывая нуклеацию и рост наноалмаза [Bernatowicz et al., 2006; Daulton, 2005]. Отмечается, что, хотя ударные волны от вспышек сверхновых могут создавать транзитные локальные области высокотемпературной конденсации в межзвездной среде, но из-за слишком короткого времени остывания в таких процессах реальная конденсация происходит именно за фронтом ударной волны в виде аморфных пленок на центрах выживших кристаллов [Ebel, 2000]. Можно предполагать, что именно таким процессом формировались отмеченные выше

графитоподобные оболочки алмазов, во всяком случае, тех, что, будучи генерированы в ряде предшествующих вспышек сверхновых, смогли пережить в протосолнечном облаке вспышки последующих сверхновых, и, главное, вспышку последней сверхновой перед формированием Солнечной системы.

Ввиду многообразия возможных астрофизических условий генерации алмаза можно ожидать его повсеместное распространение в космосе. Действительно, анализ наблюдений межзвездной экстинкции показывает, что до 10% межзвездного углерода может быть связано в межзвездном алмазе [Lewis et al., 1989]. Наноалмаз с аналогичным метеоритному логнормальным распределением по размерам зафиксирован в околозвездных дисках в системах эмиссионных звезд Хербига HD97048 и Elias 1 [Van Kerckhoven et al., 2002], в богатых углеродом протопланетных облаках [Hill et al., 1998] и даже в межпланетной пыли [Dai, et al., 2002]. Лабораторные эксперименты также показывают, что возможна нуклеация зародышей алмаза под действием УФ фотолиза межзвездных ледяных смесей ( $H_2O$ , CO,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ) в молекулярных облаках и их дальнейший рост под действием УФ в диффузных облаках [Kouchi et al., 2005].

Широкие возможности синтеза наноалмаза в космосе свидетельствуют о существовании разных популяций зерен наноалмаза, различающихся как своей структурой, обусловленной механизмом генезиса, так и (главное) своим изотопным составом, являющимся точным индикатором их астрофизических источников [Daulton, 2005]. В этой связи, наибольшее внимание привлекает популяция зерен наноалмаза, содержащих аномальную компоненту ксенона Xe-*HL*, изотопные соотношения которой могут указывать на обогащенность продуктами *p*- и *r*-процессов при вспышке сверхновой SnII, хотя соотношения изотопов углерода являются практически солнечными [Clayton, 1989; Huss and Lewis, 1995].

### Благородные газы

Естественно, что изотопные составы благородных газов в досолнечных зернах могут отражать источник их происхождения. Примерно 4% индивидуальных зерен основной популяции SiC являются носителями аномальной компоненты Ne-*E(H)*, состоящей практически из чистого  $^{22}Ne$ , который мог образоваться по реакции  $^{14}N + 2\alpha$  в гелиевой оболочке AGB-звезд. Характерным для этих звезд является *s*-процесс, приводящий к относительному обогащению четных изотопов над нечетными, что действительно наблюдается в изотопных системах Kr-*S* и Xe-*S* в отдельных зернах SiC [Nichols et al., 1992]. Редкие зерна досолнечного графита являются носителями аномальной компоненты Ne-*E(L)*, тоже состоящей из практически чистого  $^{22}Ne$ , который мог образоваться при распаде *in situ* радиоактивного  $^{22}Na$  при вспышках новых [Huss and Lewis, 1995]. Аномальная компонента Xe-*HL* (а также He-*HL*, Ne-*HL*, Ar-*HL* и Kr-*HL*), наряду с благородными газами солнечного состава, наблюдается только в зернах наноалмаза, указывая на их возможное происхождение при вспышках сверхновых [Huss and Lewis, 1995].

Аномалия ксенона является, несомненно, наиболее интригующей и широко обсуждаемой аномалией в наноалмазе метеоритов. Для досолнечных алмазов наблюдается бимодальный характер выделения ксенона: в основном, в виде компоненты Xe-*P<sub>3</sub>* с «нормальным» изотопным составом в низкотемпературной области (между 200°C и 900°C) и аномальной компоненты Xe-*HL* с экзотическим изотопным составом в высокотемпературной области (между 1100°C и 1600°C) [Huss and Lewis, 1994]. По сравнению с солнечным ксеноном, компонента Xe-*HL* обогащена примерно в 2 раза легкими нейтронодефицитными изотопами  $^{124}Xe$ ,  $^{126}Xe$  и тяжелыми нейтроноизбыточными изотопами  $^{134}Xe$ ,  $^{136}Xe$ . В 9-изотопной системе ксенона разные изотопы образовывались в разных процессах нуклеосинтеза. Тяжелые нейтроноизбыточные изотопы  $^{131,132,134,136}Xe$  являются продуктами *r*-процесса (захвата быстрых нейтронов) и, кроме того, они могут образовываться при делении  $^{244}Pu$  и  $^{238}U$ . Изотопы  $^{128-130}Xe$  – продукты *s*-процесса (захвата медленных нейтронов), но  $^{129}Xe$  может быть также радиогенным, благодаря распаду вымершего радионуклида  $^{129}I$ . Наконец, легкие нейтронодефицитные изотопы  $^{124,126}Xe$  – скорее продукты *p*-процесса (реакций с участием протонов). В то же время все изотопы ксенона могут иметь космогенные компоненты, образованные в реакциях расщепления Ba, Cs, Se и La частицами высоких энергий. Более того, достаточно обоснованными являются гипотезы, что нейтронодефицитные или, так называемые, обойденные изотопы тяжелых элементов, наряду с низко распространенными легкими элементами Li, Be и B, были образованы именно в реакциях расщепления близлежащих ядер-мишеней протонами высоких энергий [Fowler et al., 1955; Audouze, 1970; Устинова, 1996].

В процессе дальнейшей эволюции вещества изотопные соотношения газов могли изменяться, подвергаясь разным механизмам фракционирования, которые для разных объектов и разных газов были, большей частью, разделены разными пространственными и временными интервалами. Из-за разной локализации и температуры высвобождения считается, что компоненты  $\text{Xe-P}_3$  и  $\text{Xe-HL}$  сформировались как отдельные компоненты до внедрения их в зерна алмаза, которое, к тому же, было не одинаковым по времени: если внедрение  $\text{Xe-HL}$  было скорее одномоментным, то внедрение  $\text{Xe-P}_3$  было растянуто по времени [Koscheev et al., 2001]. Из этого может следовать, что резервуар  $\text{Xe-P}_3$  существовал постоянно, тогда как резервуар  $\text{Xe-HL}$  был кратковременным. Поскольку компонента  $\text{Xe-HL}$  наблюдается только в наноалмазе метеоритов и отсутствует в других досолнечных реликтах, естественно предположить, что эта компонента формировалась в тех же условиях, в которых синтезировался наноалмаз, в частности, в условиях переработки вещества ударными волнами при вспышках сверхновых.

Наблюдаемое разнообразие свойств и особенностей метеоритных наноалмазов свидетельствует о многообразии их астрофизических источников и возможных механизмов генерации и объясняет многообразие разрабатываемых моделей этих процессов. Предложен ряд механизмов формирования наноалмаза в сверхновых. Наиболее проработанной является модель [Clayton, 1989], учитывающая также и формирование тяжелого ксенона. Предполагается, что рост алмаза и имплантация  $\text{Xe}$  происходят до смешивания вещества SNII с веществом межзвездной среды. В ряде работ рассмотрены модификации возможных механизмов генерации алмаза при вспышках сверхновых. Основная проблема, с которой приходится сталкиваться при использовании данных по благородным газам – это вопрос о том, как они попали в досолнечные зерна. Естественные процессы – захват ионов кристаллами при конденсации и ионная имплантация кристаллов при высокоэнергичной переработке вещества ударными волнами – непосредственно связаны с механизмами генерации самих досолнечных зерен. На основании лабораторных экспериментов [Roy, 1987], ожидается, что метастабильный алмаз может конденсироваться из пересыщенного углеродом газа наряду со стабильным графитом, поэтому алмаз должен быть всюду, где присутствует графит, например, в околозвездной, межзвездной и межпланетной пыли (включая пыль комет). Сенсационными стали, однако, результаты исследования метеорной пыли [Dai et al., 2002]. Обнаружено, что наноалмазы практически отсутствуют в хрупких, богатых углеродом частичках пыли, часть которых прошла сквозь атмосферу при скоростях кометных метеоров. Из этого может следовать, что распространенность наноалмазов уменьшается с увеличением гелиоцентрического расстояния (что согласуется с наблюдениями наноалмазов в аккреционных дисках других молодых звезд [Van Kerckhoven et al., 2002]), так что, возможно, большая часть наноалмазов не является досолнечной, а сформировалась при образовании Солнечной системы.

В модели [Jorgensen, 1988] алмазы и  $\text{Xe-HL}$  тоже образуются в разных объектах, а именно, в областях эволюции красных гигантов на стадиях создания бинарных систем углеродных звезд и последующей вспышки углеродно-детонационной сверхновой (SnIa). Предполагается, что две углеродные звезды разной массы, вращаются возле общего центра масс на достаточно близком расстоянии, так что вещество меньшей звезды постепенно перетекает на большую, превращая ее, по мере выгорания водорода, в белый карлик. При увеличении массы до предела Чандрасекара ( $M_{chan} \approx 1.39 M_{\odot}$ ) белый карлик на стадии горения углерода и кислорода вспыхивает как SnIa. Показано, что по термодинамическим условиям алмаз может конденсироваться в холодной атмосфере меньшей углеродной звезды в конце ее эволюции. Предполагается, что  $\text{Xe-HL}$  образуется при вспышке SnIa, как и при вспышке SNII в модели [Clayton, 1989], и затем при скоростях  $\sim 10^3$  км/с имплантируется в ранее синтезированные зерна алмаза. Такое предположение, однако, не соответствует действительности, поскольку при вспышках SnIa (не содержащих тяжелого ядра углеродно-детонационных сверхновых) продукты  $r$ -процесса, а следовательно, и изотопы ксенона не образуются. При взрывном горении углерода и кислорода с высвобождением энергии  $\sim 1.3 \times 10^{51}$  эрг синтезируются все порообразующие элементы среднего атомного веса, причем с наибольшей вероятностью образуется дважды магическое ядро  $^{56}\text{Ni}$ : реакции горения C и O генерируют  $^{28}\text{Si}$ , а далее  $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni}$ . Распад  $^{56}\text{Ni}$  через 6.1 дня приводит к  $^{56}\text{Co}$ , а последний через 77 дней превращается в  $^{56}\text{Fe}$ , что подтверждается кривыми блеска SnIa [Gameso et al., 2002].

С другой стороны, поскольку компонента  $\text{Xe-HL}$  наблюдается только в наноалмазе метеоритов и отсутствует в других досолнечных реликтах, то естественно предположить, что эта компонента формировалась в тех же условиях, в которых синтезировался наноалмаз. Наиболее непротиворечивым механизмом этого процесса является одновременное с синтезом наноалмаза формирование аномальной компоненты  $\text{Xe-HL}$  и ее захват в условиях распространения взрывных

ударных волн от вспышек сверхновых [Ustinova, 2009; Устинова, 2009]. Если это так, то отсюда логически следует, что именно закономерности фракционирования и особенности изменения изотопных соотношений благородных газов при прохождении сильных ударных волн [Устинова, 2002; 2007] стали причиной экзотического изотопного состава Хе-*HL*. Это выдвигает принципиально новый возможный аспект генерации наноалмаза и формирования в нем аномальной компоненты ксенона.

### Эффекты изотопного фракционирования в ударных волнах

Существует два ключевых фактора влияния ударных волн на изотопный состав среды их прохождения: на фронте ударных волн происходит (1) усиление жесткости спектра ядерноактивных частиц и (2) его обогащение тяжелыми ионами.

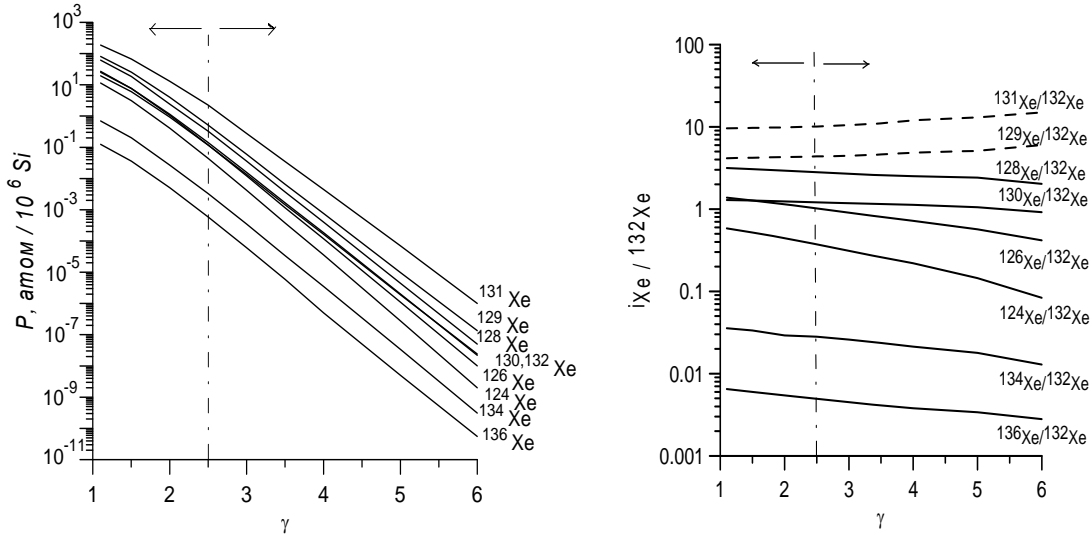
(1) Вспышки сверхновых устанавливают в их окрестности своеобразные радиационные условия, поскольку грандиозные взрывные ударные волны и сверхзвуковая турбулентность приводят к ускорению частиц в космической плазме с формированием степенного энергетического спектра  $F(>E_0) \sim E^{-\gamma}$  очень высокой жесткости ( $\gamma \rightarrow 1$ ) [Ellison and Eichler, 1984; Бережко и др., 1996]. Качественная картина этого магнитогидродинамического процесса состоит в выбивании ударной волной новых частиц из фоновой плазмы и в перекачивании частиц из низкоэнергичной области спектра в его высокоэнергичную часть. Это приводит к увеличению потоков ядерноактивных частиц выше некоторой энергии  $E_0$  (например, выше пороговой энергии ядерных реакций) на один-два порядка величины, и соответственно, на столько же увеличиваются скорости образования изотопов в реакциях расщепления, что существенно повышает их долю и роль в процессах нуклеосинтеза [Устинова, 2002; 2007]. Изменение энергетического спектра ядерноактивных частиц приводит к изменению средневзвешенных по спектру сечений образования многих изотопов, функции возбуждения которых чувствительны к форме спектра частиц. Иначе говоря, в резервуарах, переработанных ударными волнами, например, в расширяющихся оболочках сверхновых, должны наблюдаться совершенно другие соотношения изотопов и элементов, чем в веществе, не затронутом такой переработкой.

(2) Другим замечательным свойством магнитогидродинамического ускорения частиц на фронте ударных волн является обогащение спектра тяжелыми ионами. В случае многозарядных ионов, поскольку их пробег до рассеяния является функцией жесткости  $R=p/Ze$  (где  $p$  - импульс частиц, пропорциональный  $A$ ;  $Ze$  - заряд иона), эффективность ускорения зависит от отношения  $A/Z$ : ионы с большим отношением  $A/Z$  (большим пробегом) смогут с более далеких расстояний проникать в область предфронта волны (область ускорения) и, следовательно, будут ускоряться чаще [Eichler and Hainebach, 1981; Бережко и Ксенофонтов, 1999]. Известна, например, обогащенность компоненты солнечных энергичных частиц в отдельных солнечных вспышках тяжелыми ионами пропорционально  $A/Z$  или  $(A/Z)^2$  в зависимости от возможных процессов ускорения в короне (до инъекции) и/или в гелиосфере [Meyer, 1985]. Это наглядно демонстрирует, что степень фракционирования этим механизмом зависит не только от ускорения ионов, но и от числа актов ускорения. Так, фракционирование изотопов после первого акта ускорения - пропорционально  $A/Z$ ; после второго -  $(A/Z)^2$ ;... после  $n$ -го -  $(A/Z)^n$ . В случае изотопов  $i$  и  $j$  одного элемента их фракционирование после  $n$ -го акта ускорения пропорционально  $(A^i/A^j)^n$ , т.е. является обычным массфракционированием, которое также возникает, например, при диффузии из-за разной степени летучести легких и тяжелых изотопов инертных газов. Эффекты обогащения тяжелыми ядрами и изотопами наблюдаются в метеоритах (пропорционально  $(A/Z)^2$  [Rao et al., 1991]), в атмосферах планет (пропорционально  $(A/Z)^5$  [Ustinova and Marti, 2000]) и в космических лучах (при ультра высоких энергиях ( $\geq 10^7$  ГэВ) спектр космических лучей почти на  $\sim 100\%$  состоит из ядер железа [Yodh, 2005; и др.]).

Результаты современной нелинейной кинетической теории ускорения частиц ударными волнами в остатках сверхновых [Бережко и др., 1996; Бережко и Ксенофонтов, 1999] показывают, что обогащение спектров частиц тяжелыми ядрами зависит и от параметров сверхновых (количества продуктов нуклеосинтеза с данными значениями  $A$  и  $Z$ ), и от параметров (мощности) взрывных (бесстолкновительных) ударных волн, например, от темпа инъекции частиц в режим ускорения, который также является функцией жесткости частиц, а, следовательно, и функцией  $A/Z$ .

Отмеченные выше особенности влияния взрывных ударных волн при вспышках сверхновых на изменение изотопных соотношений и фракционирование вещества на фронте ударных волн должны были сильно повлиять на изотопный состав благородных газов [Устинова, 2002; 2007]. На рис.1

представлены скорости образования изотопов Xe и их соотношения в зависимости от жесткости энергетического спектра протонов. Расчеты выполнены для среднего интегрального потока протонов в ранней Солнечной системе, который по наблюдаемой средней распространенности вымерших радионуклидов и изотопов легких элементов, безотносительно к конкретной локализации процессов,



**Рис. 1.** Зависимость скоростей образования  $P$  изотопов ксенона (левый график) и изотопных отношений ксенона  $^{i}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$  (правый график) от спектрального индекса  $\gamma$  энергетического спектра ускоренных в ударных волнах радиоактивных частиц (вертикальный штрих-пунктир разделяет области жесткого ( $\gamma < 2.5$ ) и мягкого ( $\gamma > 2.5$ ) облучения).

в которых они образованы, оценивается в  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-2}$  [Audouze, 1970]. Действительно, наблюдаемым средним распространенностям  $^9\text{Be}$  и  $^6\text{Li}$  [Anders and Grevesse, 1989] соответствует средний интегральный поток протонов  $I_p(>15 \text{ МэВ}) = 1.62 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$  при  $\gamma = 2.5$  и  $\alpha/p = 0.0102$ , который при  $\gamma \rightarrow 1$  может увеличиваться на  $\sim$  два порядка величины [Устинова, 1996; 2002]. В расчетах использованы представленные в [Устинова, 2007] экспериментальные и рассчитанные функции возбуждения изотопов Xe протонами на ядрах Ba, Cs, Ce и La при их космических распространенностях из [Anders and Grevesse, 1989]. Хорошо видно, что увеличение скоростей образования изотопов Xe с усилением жесткости спектра иницирующих частиц (уменьшением  $\gamma$ ) является общей закономерностью, однако темп увеличения для разных изотопов различен, так что соотношения изотопов меняются.

Ниже в таблице 1 приведены данные [Huss and Lewis, 1994; 1995] по соотношениям изотопов Xe в компонентах Xe- $P_3$  и Xe- $HL$  из наноалмазов примитивных хондритов и рассчитанные нами соотношения изотопов Xe, генерированных в реакциях расщепления близлежащих ядер интегральным потоком протонов с нормальным энергетическим спектром (показатель  $\gamma=3$ , как для современных солнечных протонов) и с жестким энергетическим спектром на фронте ударных волн ( $\gamma \sim 1$ ). В строчках 3 и 6 сравнивается, во сколько раз наблюдаемые изотопные соотношения ксенона в Xe- $HL$  выше, чем в Xe- $P_3$ , и во сколько раз изотопные соотношения космогенного ксенона, генерированного на фронте ударных волн (Xe ( $\gamma \sim 1$ )), выше, чем в спокойной среде (Xe ( $\gamma=3$ )). Поразительное соответствие сравниваемых величин, несомненно, выявляет спаллогенную природу и эффекты условий формирования аномальной компоненты, а именно, указывает на изменение скоростей образования изотопов на фронте ударных волн как на основную причину отличия этой компоненты от других компонент Xe. Естественно, что наилучшее соответствие наблюдается именно для легких нейтронодефицитных изотопов, образующихся, в основном, в реакциях расщепления и других реакциях с протонами ( $p$ - процесс), что служит естественным объяснением генезиса легкой компоненты Xe- $L$  именно в жестких радиационных условиях предфронта взрывной ударной волны. Более того, в таблице 1 хорошо видно, что характерные для  $s$ -процесса нуклеосинтеза соотношения изотопов ксенона средних массовых чисел тоже могут формироваться в реакциях расщепления протонами в условиях их ускорения на фронте взрывной ударной волны. Этот момент очень важен. Дело в том, что  $s$ -процесс мало эффективен при вспышках сверхновых, что нарушает единство концепции синтеза алмаза с наблюдаемыми соотношениями изотопов ксенона в этом процессе:

приходится привлекать возможность предварительного образования Xe-S в атмосферах AGB-звезд и достаточно искусственные модели необходимого последующего смешивания вещества.

**Таблица 1.** Наблюдаемые соотношения изотопов ксенона в компонентах Xe-HL и Xe-P<sub>3</sub> в наноалмазах примитивных хондритов в сравнении с изотопными соотношениями ксенона, генерированного в реакциях расщепления близлежащих ядер ускоренными в ударных волнах протонами при разной жесткости их энергетического спектра: Xe ( $\gamma \sim 1$ ) - на фронте ударных волн и Xe ( $\gamma = 3$ ) – в спокойной среде

№	Компоненты Xe	$\frac{^{124}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{126}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{128}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{129}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{130}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{131}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{134}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{136}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$
1	Xe-HL*	0.0084	0.0057	0.091	1.06	0.154	0.844	0.636	0.7
2	Xe-P <sub>3</sub> *	0.0045	0.004	0.081	1.04	0.159	0.823	0.377	0.31
3	$\frac{\text{Xe-HL}^*}{\text{Xe-P}_3^*}$	<b>1.86</b>	<b>1.43</b>	<b>1.12</b>	<b>1.02</b>	<b>0.97</b>	<b>1.03</b>	<b>1.85</b>	<b>2.26</b>
4	Xe ( $\gamma \sim 1$ )	0.58	1.38	3.16	4.16	1.29	9.61	0.036	0.0065
5	Xe ( $\gamma = 3$ )	0.31	0.90	2.69	4.44	1.18	10.44	0.026	0.0045
6	$\frac{\text{Xe}(\gamma \sim 1)}{\text{Xe}(\gamma = 3)}$	<b>1.87</b>	<b>1.53</b>	<b>1.17</b>	<b>0.94</b>	<b>1.09</b>	<b>0.92</b>	<b>1.38</b>	<b>1.44</b>
7	$\frac{\text{Xe}(\gamma \sim 1)}{\text{Xe-HL}^*}$	69.05	242.11	34.73	3.92	8.38	11.39	0.057	0.0093
8	$\frac{\text{Xe}(\gamma = 3)}{\text{Xe-P}_3^*}$	68.89	225.00	33.21	4.27	7.42	12.69	0.069	0.0145

\* по данным [Huss, Lewis, 1994; 1995]

Из таблицы 1 следует, что только для образования самых тяжелых изотопов <sup>134</sup>Xe и <sup>136</sup>Xe не достаточно реакций расщепления на фронте ударных волн и требуется дополнительный нуклеогенетический источник. Естественно, что локальные области остатков сверхновых до своего полного перемешивания с веществом протозвездного облака или межзвездной средой относительно обогащены продуктами нуклеосинтеза, в частности, тяжелыми изотопами <sup>134</sup>Xe и <sup>136</sup>Xe, генерированными в r-процессе. В свою очередь, кратковременные локальные области предфронта взрывной ударной волны являются наиболее обогащенными резервуарами этих изотопов, дополняющими формирование тяжелой компоненты Xe-H. Плотность вещества в ударных фронтах сверхновых достигает значений  $\sim 10^3\text{-}10^4$  г см<sup>-3</sup> [Dighe, 2005]. На стадии, когда ударная волна является наиболее активной (до начала процессов ее диссипации) степень сжатия вещества в области предфронта является неограниченной функцией числа Маха и может возрастать на порядки величины: например,  $\sigma \approx 77$  при  $M = 330$  [Бережко и др., 1996]. В современных экспериментах с ударными волнами удастся достичь максимальных давлений  $\sim 4$  Гбар и температур  $\sim 10^7$  К [Фортон, 2009]. Действительно, ударная волна не только сжимает вещество, но и разогревает его до высоких температур. Фронт ударной волны – это вязкий скачок уплотнения, где кинетическая энергия набегающего потока преобразуется в тепловую энергию сжатой и необратимо разогретой среды [Фортон, 2009]. В то же время, в зонах разрежения за фронтом взрывной ударной волны от сверхновой температура снижается в 2.5 раза [Бережко и др., 1996]. Если учесть еще обогащенность области предфронта металлами и их каталитические свойства, то эти условия могут рассматриваться, как идеальные, для быстрого синтеза и конденсации кристаллов алмаза при их одновременном обогащении как тяжелым Xe-H, так и легким Xe-L, т.е. при одновременном формировании экзотической компоненты Xe-HL. Одновременно мог захватываться и Xe-P<sub>3</sub>, но скорее всего, эта компонента имплантировалась позднее при однородном перемешивании вещества сверхзвуковой турбулентностью и продолжалась вплоть до аккреции родительских тел метеоритов.

Зерна наноалмаза с изотопными аномалиями благородных газов составляют примерно одну миллионную часть всех метеоритных наноалмазов [Bernatowicz et al., 2006]. Проблема состоит в том, что микроструктура именно этих индивидуальных зерен наноалмаза неизвестна, что не позволяет отдать предпочтение тому или иному механизму их генерации. Следует, однако, подчеркнуть, что

при прохождении ударных волн от вспышек сверхновых синтез алмаза и его обогащение аномальным Xe-*HL* возможны и в экстремальных *PT*-условиях области предфронта волны, и путем нуклеации в области разрежения за фронтом волны, и при облучении углеродистых зерен частицами высоких энергий. Аномальный изотопный состав Xe-*HL* является следствием усиления жесткости спектра ядерноактивных частиц и его обогащения тяжелыми ионами при ускорении в ударных волнах [Устинова, 2002; 2007].

Не менее важен и вопрос о том, как благородные газы могли сохраниться в досолнечных зернах, переживших экстремальные *PT*-условия коллапса протосолнечного облака в протосолнце. Ранее при исследовании генезиса аномальных компонент Ne-*E* было показано [Лаврухина и Устинова, 1992; 1993] что наблюдаемые диапазоны содержаний Ne-*E(H)* в SiC (2060-35800)  $10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г и Ne-*E(L)* в графитовых шариках (4240-14000)  $10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г хондрита Murchison [Amari et al., 1990; Lewis et al., 1990], скорее всего, были образованы ядерноактивными частицами, ускоренными на фронте взрывной ударной волны от вспышки последней сверхновой. Досолнечные зерна должны были неизбежно потерять как термоядерный, так и радиогенный <sup>22</sup>Ne предыдущих поколений, а также <sup>21</sup>Ne от досолнечного облучения этих зерен, поскольку температура в коллапсирующем протосолнечном облаке могла достигать  $10^9$  К [Фортон, 2009]. Аналогично, можно ожидать, что досолнечный наноалмаз, скорее всего, тоже потерял газы предыдущих поколений, а наблюдаемая в хондритах популяция наноалмаза с аномальной компонентой Xe-*HL* была генерирована при прохождении взрывной ударной волны от вспышки последней сверхновой [Устинова, 2009].

В то же время не следует, по-видимому, ожидать, что наноалмазы этой популяции не претерпели никаких изменений с момента их формирования и до момента их исследования в хондритах, и что ксенон сохранился с теми же изотопными соотношениями, с которыми он был генерирован. В таблице 1 сравниваются наблюдаемые изотопные соотношения ксенона в компоненте Xe-*HL* с теоретическими при  $\gamma \sim 1$  (строка 7) и в компоненте Xe-*P<sub>3</sub>* с теоретическими при  $\gamma = 3$  (строка 8). Хорошо видно, что сохранившийся в наноалмазе ксенон существенно тяжелее, чем первоначально генерированный, причем практически в одинаковой степени для обоих компонент. Последнее говорит о том, что приведшие к такому утяжелению процессы произошли уже после формирования этих компонент. Во-первых, это могло случиться при захвате ксенона зернами наноалмаза, особенно при его синтезе в CVD-процессе. Действительно, экспериментально установлено [Ponganis et al., 1997], что при относительно низких скоростях имплантации газов происходит утяжеление изотопных составов их захваченных компонент. Такое фракционирование, возможно, обусловлено тем, что тяжелые ионы легче застревают в решетках кристаллов. Во-вторых, все прогнозируемые кинетические процессы самодиффузии и диффузии газов при экстремальных *PT*-условиях приводят к изотопному фракционированию с утяжелением их изотопных систем. С ростом давления и температуры вещество приобретает все более универсальную, упорядоченную и упрощенную структуру. В частности, упорядочивается и его кристаллическая решетка, становясь, как минимум, все более плотно упакованной из-за разрушения ловушек и устранения дислокаций, а в случае сверх экстремальных состояний кристаллическая решетка преобразуется в плотноупакованную объемно-центрированную кубическую структуру [Фортон, 2009]. Поскольку в веществе углистых хондритов нет признаков сильных термальных изменений, то наиболее вероятной стадией, на которой наноалмазы могли испытывать такие воздействия, была стадия ранней аккреции в протопланетном облаке на формирующийся диск, когда в локальных процессах температура могла превышать 1500-2000 К [Дорофеева и Макалкин, 2004]. Кроме естественного фракционирования при оседании на диск, многие процессы при аккреции сопровождались кинетическим изотопным фракционированием, что приводило к утяжелению изотопных систем элементов, особенно летучих. Действительно, ударный фронт от вспышки протосолнца, мощные протосолнечные ветры, их взаимодействие с веществом нарождающегося диска, ударные аккреционные волны, турбулентность и другие мощные нестационарные процессы на стадии молодого Солнца приводили к многократным актам частичной рекристаллизации зерен наноалмаза. Это сопровождалось диффузией и улетучиванием газов из разрушенных ловушек, трещин и других устраняемых рекристаллизацией нарушений кристаллической решетки и, как следствие, к постепенному существенному обогащению изотопных систем сохранившихся газов тяжелыми изотопами, в частности, всех наблюдаемых компонент ксенона в наноалмазе хондритов в сравнении с их изначальными изотопными системами при генерации.

По многим признакам последняя сверхновая была углеродно-детонационной сверхновой (SnIa) [Устинова, 2007]. Поскольку, в эпоху формирования Солнечной системы, углеродных звезд, участвующих в формировании SnIa, было гораздо больше, чем в настоящее время [Jorgensen, 1988],



то вспышка SnIa происходила в среде обогащенной углеродом, что создавало наиболее благоприятные условия для синтеза наноалмазов с практически солнечным изотопным составом углерода. Поскольку SnIa лишена тяжелого ядра и водородной оболочки [Gameso et al., 2002], ее собственные продукты *r*- и *p*-процессов, в их обычном определении, не образуются, так что при синтезе наноалмазов Xe-H и Xe-L, могли черпаться только из ресурсов протосолнечного облака, обогащенного продуктами *r*- и *p*-процессов от предшествующих вспышек SnII. Однако наиболее благоприятный для синтеза наноалмаза фронт взрывной ударной волны от вспышки SnIa был наиболее обогащен именно Xe-H и обеднен Xe-L из-за преимущественного ускорения на ударном фронте именно тяжелых изотопов среды [Eichler and Hainebach, 1981; Бережко и Ксенофонтов, 1999]. В то же время, из-за ускорения на ударном фронте энергетический спектр протонов среды становился более жестким [Ellison and Eichler, 1984; Бережко и др., 1996], так что интегральные потоки протонов выше пороговых энергий ядерных реакций возрастали до двух порядков величины [Устинова, 2002; 2007]. Соответственно возрастали и скорости образования изотопов протонами в реакциях расщепления близлежащих ядер мишеней. Можно сказать, что *p*-процесс при вспышке SnIa проходил преимущественно через реакции расщепления протонами. Следовательно, фронт взрывной ударной волны от вспышки SnIa был обогащен Xe-H от предшествующих вспышек SnII и свежесинтезированными в реакциях расщепления легкими изотопами Xe-L. Таким образом, именно вспышка SnIa создала необходимые благоприятные условия для синтеза при коллапсе протосолнечного облака (и на базе его ресурсов) наблюдаемой в метеоритах популяции наноалмаза с аномальной компонентой Xe-HL. Такая концепция согласуется с результатами изучения межпланетной пыли [Dai, et al., 2002], свидетельствующими о том, что наноалмазы отсутствуют в пыли комет и/или их распространенность уменьшается с увеличением гелиоцентрического расстояния. Такая модель согласуется также с упоминавшимися выше наблюдениями наноалмазов вблизи ряда эволюционирующих звезд с аккреционными дисками [Van Kerckhoven et al., 2002]. Все это позволяет дать вполне определенный ответ на поставленный в [Dai, et al., 2002] вопрос: все ли наноалмазы являются досолнечными?

Нельзя, конечно, исключить, что, несмотря на мощность энерговыделения  $\sim 10^{51}$  эрг при вспышке SnIa, где-то на периферии коллапсирующего протосолнечного облака смогли выжить досолнечные наноалмазы других генераций и даже сохранить благородные газы своих астрофизических источников. Например, в грубозернистой фракции наноалмаза из примитивного углистого хондрита Борискино измерены Xe-S и Ne-E с типичными изотопными составами, свидетельствующими о его генерации в атмосферах AGB-звезд [Verchovsky et al., 2006]. По оценкам авторов этой работы, относительная распространенность в хондритах досолнечной популяции наноалмаза, генерированного в атмосферах AGB-звезд, составляет лишь  $\sim 1\%$ , а досолнечной популяции наноалмаза, синтезированного при вспышках SnII,  $< 0.1\%$ , т.е., еще на порядок меньше.

## Заключение

В итоге, можно сформулировать следующий краткий сценарий. Протосолнечное облако содержало наноалмазы и изотопы ксенона, генерированные в нескольких вспышках SnII. Последней вспышкой перед формированием Солнечной системы была вспышка SnIa, при которой все ранее синтезированные зерна наноалмаза практически потеряли благородные газы предшествующих генераций. В условиях распространения взрывной ударной волны от вспышки SnIa (число Маха  $\sim 100$  [Фортон, 2009]) синтезировались новые наноалмазы. На фронте ударной волны они захватывали изотопы ксенона, образованные в реакциях расщепления близлежащих ядер ускоренными в ударной волне протонами с очень жестким энергетическим спектром (спектральный индекс  $\gamma \sim 1$ ), а также самые тяжелые изотопы ксенона от предшествующих вспышек SnII, которыми фронт ударной волны был обогащен. Возможность такого процесса позволяет предполагать, что, по крайней мере, наблюдаемая в хондритах популяция наноалмаза, содержащая аномальную компоненту ксенона Xe-HL, была синтезирована при формировании Солнечной системы, т.е. не является досолнечной.

## Литература

- Бережко, Е. Г., В. К. Елшин, Л. Т. Ксенофонтов (1996), Ускорение космических лучей в остатках сверхновых, *ЖЭТФ*, 109, 3-43.  
 Бережко, Е. Г., Л. Т. Ксенофонтов (1999), Состав космических лучей, ускоренных в остатках сверхновых, *ЖЭТФ*, 116, 737-759.

- Дорофеева, В. А., А. Б. Макалкин (2004), *Эволюция ранней Солнечной системы (космохимические и физические аспекты)*, УРСС, Москва.
- Лаврухина, А. К., Г. К. Устинова (1992), Эффекты ядерных реакций с быстрыми частицами при вспышке сверхновой, *Астрон. вестн.*, 26, 62-71.
- Лаврухина, А. К., Г. К. Устинова (1993), Возможный механизм формирования изотопных аномалий при вспышке сверхновой, *Геохимия*, No. 3, 320-337.
- Устинова, Г. К. (1996), К проблеме происхождения Li, Be и B в ранней Солнечной системе, *Астрон. вестник*, 30, 483-495.
- Устинова Г. К. (2002), Механизмы формирования изотопной гетерогенности первичного вещества Солнечной системы в ударных волнах, *Геохимия*, No.9, 915-932.
- Устинова, Г. К. (2007), К проблеме происхождения Солнечной системы: Закономерности фракционирования благородных газов в ударных волнах, *Астрон. вестник*, 41, 252-277.
- Устинова, Г. К. (2009), К происхождению аномальной компоненты Xe-HL в наноалмазе хондритов, *Доклады РАН*, 429, 249-252.
- Фортов, В. Е. (2009), Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе, *УФН*, 179, 653-687.
- Amari, S., E. Anders, A. Virag, E. Zinner (1990), Interstellar graphite in meteorites, *Nature*, 345, 238-240.
- Anders, E., N. Grevesse (1989) Abundances of the elements: Meteoritic and solar, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 197-214.
- Audouze, J. (1970), Some nucleosynthetic effects of energetic proton fluxes on stellar surfaces and on the solar system, *Astron. Astrophys.*, 8, 436-457.
- Bernatowicz, T. J., T. K. Croat, T. L. Daulton (2006), Origin and evolution of carbonaceous presolar grains in stellar environments // *Meteorites and the early solar system (Eds. D. S. Lauretta and H. Y. McSween)* UAP, Tucson, 109-126.
- Braatz, A., U. Ott, T. Henning, C. Jager, G. Jeschke (2000), Infrared, ultraviolet, and electron paramagnetic resonance measurements on presolar diamonds: Implications for optical features and origin, *Meteoritics and Planetary Science*, 35, 75-84.
- Clayton, D. D. (1989), Origin of heavy xenon in meteoritic diamonds, *Astrophys. J.*, 340, 613-619.
- Dai, Z. R., J. P. Bradley, D. J. Joswiak, D. E. Brownlee, H. G. M. Hill, M. J. Genge (2002), Possible in situ formation of meteoritic nanodiamonds in the early solar system, *Nature*, 418, 157-159.
- Daulton, T. L. (2005), Nanodiamonds in the cosmos, *Synthesis, properties and applications of ultrananocrystalline diamond (Eds. D.M. Gruen, O.A. Shenderova and A.Ya. Vul')*, Springer, Netherlands, 49-62.
- Dighe, A. (2005), Supernova: The cosmic competitor of neutrino factories, *Rep. at 29<sup>th</sup> ICRC, Puna*, <http://icrc2005.tifr.res.in/>
- Ebel, D. S. (2000), Variations on solar condensation: Sources of interstellar dust nuclei, *J. Geophys. Res.*, 105, 10363-10370.
- Eichler, D., K. Hainebach (1981), Abundance enhancements in cosmic rays produced by collisionless shocks, *Phys.Rev.Lett.*, 47, 1560-1563.
- Ellison, D. C., D. Eichler (1984), Monte Carlo shock-like solutions to the Boltzmann equation with collective scattering, *Astrophys.J.*, 256, 691-701.
- Fowler, W. A., G. R. Burbidge, E. M. Burbidge (1955), Nuclear reactions and element synthesis in the surfaces of stars, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 2, 167-194.
- Gameso, V. N., A. M. Khokhlov, E. S. Oran, A. Y. Chtchelkanova, R. O. Rosenberg (2002), Thermonuclear supernovae: Simulations of the deflagration stage and their implications, *Science*, 299, 77-81.
- Hill, H. G., A. P. Jones, L. B. d'Hendecourt (1998), Diamonds in carbon-rich protoplanetary nebulae, *Astron. Astrophys.*, 336, 41-44.
- Huss, G. R. (2004), Implications of isotopic anomalies and presolar grains for the formation of the solar system, *Antarct. Meteorite Res.*, 17, 132-152.
- Huss, G. R., R. S. Lewis (1994), Noble gases in presolar diamonds I: Three distinct components and their implications for diamond origin, *Meteoritics*, 29, 791-810.
- Huss, G. R., R. S. Lewis (1995), Presolar diamond, SiC, and graphite in primitive chondrites: Abundances as a function of meteorite class and petrologic type, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 59, 115-160.
- Jorgensen, U. G. (1988), Formation of Xe-HL-enriched diamond grains in stellar environments, *Nature*, 332, 702-705.
- Koscheev, A. P., M. D. Gromov, R. K. Mohapatra, U. Ott (2001), History of trace gases in presolar diamonds inferred from ion-implantation experiments, *Nature*, 412, 615-617.

- Kouchi, A., H. Nakano, Y. Kimura, C. Kaito (2005), Novel routs for diamond formation in interstellar ices and meteoritic parent bodies, *Astrophys. J.*, 626, L129-L132.
- Lewis, R. S., S. Amari, E. Anders (1990), Pristine material from carbon stars, *Nature*, 348, 293-298.
- Lewis, R. S., E. Anders, B. T. Draine (1989), Properties, detectability and origin of interstellar diamonds in meteorites, *Nature*, 339, 117-121.
- Meyer, J. P. (1985), The baseline composition of solar energetic particles; Solar-stellar outer atmospheres and energetic particles, and galactic cosmic rays, *Astrophys.J.(Suppl.)*, 57, 151-171; 173-204.
- Nichols, R. H., C. M. Hohenberg, P. Hoppe, S. Amari, R. S. Lewis (1992),  $^{22}\text{Ne}-E(H)$  and  $^4\text{He}$  in singl SiC grains and  $^{22}\text{Ne}-E(L)$  in single  $\text{C}_\alpha$  grains of known C-isotopic compositions, *Lunar Planet. Sci. 23<sup>rd</sup>*. LPI, Houston, 989-990.
- Ponganis, K. V., Th. Graf, K. Marti (1997), Isotopic fractionation in low-energy ion implantation, *J. Geophys. Res.*, 102, 19335-19343.
- Rao, M. N., D. H. Garrison, D. D. Boggard, G. Badhwar, A. V. Murali (1991), Composition of the solar flare noble gases preserved in meteorite parent body regolith, *J. Geophys. Res.*, 96, 19321-19330.
- Raty, J. -Y., G. Galli (2005), Structural and electronic properties of isolated nanodiamonds: A theoretical perspective, *Synthesis, properties and applications of ultrananocrystalline diamond (Eds. D.M. Gruen, O.A.Shenderova and A.Ya. Vul')*, Springer, Netherlands, 15-24.
- Roy, R. (1987), Diamonds at low pressure, *Nature*, 325, 17-18.
- Shenderova, O. A., V. V. Zhirnov, D.W. Brenner (2002), Carbon nanostructures, *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 27, 227-356.
- Ustinova, G. K. (2009), On origin of Xe-HL in meteoritic nanodiamonds, *Lunar Planet. Sci. 40<sup>th</sup>*, LPI, Houston, Abstr. #1007.
- Ustinova, G. K., K. Marti (2000), Possible fractionation of noble gases in shock waves, *Lunar Planet. Sci. 31<sup>st</sup>*, LPI, Houston, Abstr. #1230.
- Van Kerckhoven, C., A. G. G. M. Tielens, C. Waelkens (2002), Nanodiamonds around HD 97048 and Elias1, *Astron. Astrophys*, 384, 568-584.
- Verchovsky, A. B., A. V. Fisenko, L. F. Semjonova, J. Bridges, M.R. Lee, I. P. Wright (2006), Nanodiamonds from AGB stars – a new type of presolar grain in meteorites, *Astrophys. J.*, 651, 481-490.
- Yodh, G. (2005), Cosmic rays, particle physics and the high energy frontier // *Review report at 29<sup>th</sup> Int. Cosm. Ray Conf.*, Puna, <http://icrc2005.tifr.res.in/>
- Zavodinsky, V. G. (2005), Stabilization of diamond-like clusters by metallic atoms and the epitaxial growth of diamond films: *ab initio* simulation, *Synthesis, properties and applications of ultrananocrystalline diamond (Eds. D.M. Gruen, O.A.Shenderova and A.Ya. Vul')*, Springer, Netherlands, 157-168.

Г. К. УСТИНОВА Учреждение Российской академии наук Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, ул. Косыгина 19, 119991 Москва, Россия, тел: +7 496 210 267, e-mail: [ustinova@dubna.net.ru](mailto:ustinova@dubna.net.ru)