

НАНОАЛМАЗ МЕТЕОРИТОВ: КОНЦЕНТРАЦИИ И КИНЕТИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ КСЕНОНА

© 2022 г. А. В. Фисенко^а*, Л. Ф. Семенова^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
ГСП-1, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

*e-mail: anat@chgnet.ru

Поступила в редакцию 20.05.2021 г.

После доработки 21.10.2021 г.

Принята к публикации 24.10.2021 г.

Неопределенность изотопных составов исходных (первичных) компонентов ксенона, образующих его измененный состав, в наноалмазе метеоритов требует более углубленного анализа этих данных и моделирования с использованием различных исходных составов. В этой работе нами впервые проведен анализ содержаний компонентов ксенона в обогащенных наноалмазом фракциях метеоритов Orgueil (C1) и Indarch (EH3-4). Эти содержания были вычислены в предположении, что Хе-НЛ и Хе-Р6е состоят из смеси Хе-Р3 и аномальных по изотопному составу субкомпонентов, обозначенных нами как Хе-рг1 и Хе-рг2, соответственно. Две последние компоненты могли быть образованы в р- и г-процессах нуклеосинтеза при взрыве одной из сверхновых II типа. Изотопные составы компонентов Хе-рг1 и Хе-рг2 были вычислены в предположении, что в компонентах Хе-НЛ и Хе-Р6е почти изотопно нормальной компонентой является Хе-Р3. На основании вычисленных содержаний исходных Хе-Р3, Хе-рг1 и Хе-рг2 компонентов в наноалмазе таких метеоритов как Indarch (EH3-4) и Orgueil (C1) установлено следующее: 1. Каждая из компонентов Хе-рг1, Хе-рг2 и Хе-Р3 находится в индивидуальных популяциях зерен алмаза с разной термоокислительной стабильностью. По относительному содержанию компонентов ксенона основным из них является Хе-Р3. 2. Различия между компонентами Хе-рг1 и Хе-рг2 по значениям изотопных отношений $^{124}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ и $^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ обусловлены, вероятно, по модели Отта (Ott, 1969), ограничением продолжительности образования изотопов Хе в результате распада их радиоактивных предшественников с момента взрыва сверхновой до их захвата: для Хе-рг2 равны 1.89 ч, тогда как для Хе-рг1 – 2.17 ч. Предполагается, что фазы носители с компонентами Хе-рг1 и Хе-рг2 образованы в различных турбулентных зонах смешения фрагментов внешних и внутренних слоев сверхновых II типа.

Ключевые слова: наноалмаз метеоритов, изотопный состав ксенона, содержания исходных компонентов ксенона

DOI: 10.31857/S0016752522060024

ВВЕДЕНИЕ

В наноалмазе метеоритов каждый из благородных газов – это смесь нескольких его компонентов с различными изотопными составами (Huss, Lewis, 1994a). Эта особенность обусловлена разными астрофизическими источниками газов и процессами их нуклеосинтеза. Выделить в чистом виде и идентифицировать исходные (первичные) индивидуальные компоненты благородных газов также как и анализировать Хе в отдельных зернах в настоящее время не представляется возможным из-за нанометровых размеров зерен алмаза (в среднем 26 Å) (Lewis et al., 1989) и крайне низких содержаний благородных газов в индивидуальных зернах. Тем не менее, возможные изотопные составы компонентов благородных газов, в частности ксенона, были определены на основании

корреляционного анализа измеренных изотопных отношений ксенона, выделенного при ступенчатом пиролизе из обогащенных наноалмазом фракций различных метеоритов (Huss, Lewis, 1994a). Полученные изотопные составы компонентов ксенона были обозначены как Хе-Р3, Хе-НЛ, Хе-Р6 или Хе-Р6ехотич (далее обозначена как Хе-Р6е) и Хе-С. При определении изотопных составов для Хе-Р3 и Хе-Р6 отношение $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ было принято равным 0.31 (близко к минимально измеренному), тогда как для Хе-НЛ и Хе-Р6е – 0.70 (близко к максимально измеренному) и 0.55, соответственно. Этими авторами было получено, что компоненты Хе-Р3 и Хе-Р6 имеют почти “нормальные” изотопные составы, т.е. они подобны солнечному составу ксенона, но несколько различны между собой, тогда как компоненты Хе-НЛ и Хе-Р6е изотопно-аномальны из-за рез-

кого обогащения легкими ($^{124}, ^{126}\text{Xe}$) и тяжелыми ($^{134}, ^{136}\text{Xe}$) изотопами по сравнению с солнечным составом. Одновременное обогащение ксенона этими изотопами обусловлено некоторой (дополнительной) долей этих изотопов, образованных, наиболее вероятно, при взрыве сверхновой II типа. Источником изотопов $^{124}, ^{126}\text{Xe}$ предполагается р-процесс (фоторасщепление) во внутренних оболочках сверхновой (Rayet et al., 1995), тогда как изотопы $^{134}, ^{136}\text{Xe}$ образуются при быстром процессе захвата нейтронов (г-процесс), например, при “мини г-процессе” в С- и He-оболочках сверхновой (например, Neumann, Dzierżaniewicz, 1979; Clayton, 1989; Howard et al., 1992). Избытки всех тяжелых изотопов (т.е. “ветвь” Хе-Н) компонента Хе-НL могли быть образованы также при классическом г-процессе при взрыве сверхновой, но с ограниченным временем образования изотопов ксенона в результате распада их радиоактивных предшественников (Ott, 1996), которые могли отделяться от продуктов распада. Возможны и другие астрофизические источники избыточных изотопов Хе-НL и Хе-Р6е. Предполагается, например, что образование почти всех обогащенных нейтронами изотопов могло произойти в г-процессе при слиянии (поглощении) нейтронных звезд (Thielemann et al., 2017). Тем не менее сверхновые II типа как единый источник всех избыточных изотопов в компонентах Хе-НL и Хе-Р6е и содержащих их зерна нанодиамаза в настоящее время представляется предпочтительным. Отметим, что пока не удается разделить между собой зерна алмаза с избытками только легких или тяжелых изотопов ксенона. Промежуточные по массе изотопы компонента Хе-НL с массой 128–132, кроме ^{130}Xe , могли быть образованы как в г-процессе при взрыве сверхновой, так и при медленном (s-процесс) захвате нейтронов (например, в звездах асимптотической ветви гигантов). Изотоп ^{130}Xe был образован только в s-процессе нуклеосинтеза, так как цепочки последовательных б-распадов, образующихся в г-процессе нейтронно-избыточных ядер останавливаются на стабильном изотопе ^{130}Te . Таким образом, Хе-НL и Хе-Р6е – это смесь изотопов ксенона, образованных в разных процессах нуклеосинтеза и, возможно, в астрофизических источниках. В настоящее время общепринято, что аномальные по изотопному составу компоненты ксенона – это смесь двух субкомпонентов: почти “нормального” по изотопному составу ксенона и аномального, обусловленного изотопами ксенона, образованными в вышеупомянутых процессах.

Поэтому изотопный состав аномальных субкомпонентов можно определить, вычитая из состава компонентов Хе-НL и Хе-Р6е их изотопно-“нормальную” составляющую, нормируя ее к содержанию всего ^{130}Xe . Изотопный состав “нор-

мального” ксенона принимается равным, например, составу солнечного ксенона (Ott, 1996) или Хе-Р3. Использование Хе-Р3 более предпочтительно, т.к. состав этой компоненты является одним из конечных членов почти линейной зависимости на трех изотопном графике $^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ и $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$, на основании которой был определен изотопный состав Хе-НL (Huss, Lewis, 1994a). Может ли и при каких условиях после взрыва сверхновой образоваться индивидуальная популяция зерен нанодиамаза только с аномальными субкомпонентами ксенона – открытые вопросы. Возможно, например, что предшественником этих зерен была углеродная фаза с сорбированными изотопами ксенона, образованными в р- и г-процессах нуклеосинтеза. Образование нанодиамаза из этой фазы могло произойти, например, в результате ультрафиолетового облучения.

Возможность образования нанодиамаза из органического вещества в молекулярном облаке под действием ультрафиолетового облучения была показана, на пример, в работе (Kouchi A. et al., 2005). Также может быть, что аномальный и изотопно нормальный Хе были смешаны и стали единым компонентом до имплантации в зерна алмаза. Впервые содержания компонентов Хе-Р3, Хе-Р6 и Хе-НL были вычислены на основании данных для благородных газов, полученных при ступенчатом пиролизе обогащенных нанодиамазом фракций различных метеоритов в работе (Huss, Lewis, 1994a).

Анализ вычисленных содержаний компонентов Хе-Р3, Хе-Р6 и Хе-НL и кинетики их выделения при ступенчатом пиролизе нанодиамаза различных метеоритов показал следующие их основные особенности (Huss, Lewis, 1994b). Выделение Хе-Р3 из нанодиамаза наименее термально метаморфизованных метеоритов, например Orgueil (CI), является бимодальным с максимумами выделения около 500 и 1420°C. Компоненты Хе-НL и Хе-Р6 – высокотемпературные с максимумами выделения в интервале 1400–1650°C, причем Хе-Р6 несколько более высоко температурный, чем Хе-НL. С увеличением степени термального метаморфизма родительских тел метеоритов содержание компонента Хе-Р3 резко уменьшается. Так, например, в нанодиамазе метеорита Indarch (EH3-4), испытавшего термальный метаморфизм при 630°C, Хе-Р3 практически не наблюдается. Вероятно, что эти особенности выделения и содержаний компонентов ксенона изменятся, если, в частности, использовать вместо компонента Хе-НL его аномальную по составу субкомпоненту при оставшихся без изменений остальных компонентов Хе-Р3, Хе-Р6 и Хе-S. Это было показано нами при анализе ксенона в обогащенных нанодиамазом фракциях таких разных метеоритах как Orgueil (CI), Tieschitz (H3.6) и Indarch (EH3-4)

Таблица 1. Изотопный состав компонентов ксенона ($^{132}\text{Xe} \equiv 100$)

Компоненты	^{124}Xe	^{126}Xe	^{128}Xe	^{129}Xe	^{130}Xe	^{131}Xe	^{134}Xe	^{136}Xe
HL*	0.842(9)	0.569(9)	9.05(6)	105.6(2)	15.44(3)	84.42(13)	63.61(13)	70
P3*	0.451(6)	0.404(4)	5.06(2)	104.2(4)	15.91(2)	82.32(10)	37.70(10)	31.0
S**	0	0.033(19)	21.59(14)	11.8(1.1)	48.26(42)	18.6(1.2)	2.22(53)	0.34
P6e*	0.687(8)	0.521(8)	8.99(5)	107.8(2)	15.89(3)***	83.55(13)	51.80(13)	55
pr1	13.68	5.99	41.57	151.6	0	153.4	914.8	1351
pr2	47.38	20.49	193.0	820.1	0	326.9	2842	4804

*Huss, Lewis, 1994a; ** Lewis et al., 1994; *** При вычислениях использовали $^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} = 15.83$.

(Фисенко и Семенова, 2020). Выбор этих метеоритов из исследованных в работе (Huss, Lewis, 1994a) обусловлен тем, что родительское тело метеорита Orgueil испытало наиболее сильные водные изменения при слабом термальном метаморфизме (около 100°C), тогда как метеорита Indarch – наиболее сильный термальный метаморфизм (около 630°C). Родительское тело обыкновенного хондрита Tieschitz (H3.6) испытало более слабый термальный метаморфизм, чем Indarch. Использование аномальной субкомпоненты вместо Хе-НЛ привело к предполагаемому существенному увеличению содержания высокотемпературного изотопно-нормального компонента Хе-Р3 в указанных метеоритах по сравнению с таковыми в работе (Huss, Lewis, 1994b). Эти различия могут привести к разным сценариям происхождения и процессов захвата компонентов ксенона в нанодиамазе метеоритов.

В данной работе мы приводим результаты вычислений содержаний компонентов ксенона в обогащенных нанодиамазом фракциях метеоритов Orgueil (CI) и Indarch (EH3-4) при использовании аномальных субкомпонентов (вместо Хе-НЛ и Хе-Р6), отнесенных нами к возможным исходным компонентам и обозначенных далее как Хе-р1 и Хе-р2. Полученные данные были использованы для анализа кинетики выделения этих компонентов Хе при ступенчатом пиролизе, а также для установления их возможных фаз носителей.

ВЫЧИСЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЙ ВОЗМОЖНЫХ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ КСЕНОНА В ОБОГАЩЕННЫХ НАНОАЛМАЗОМ ФРАКЦИЯХ МЕТЕОРИТОВ

Вычисления содержаний компонентов ксенона Хе-Р3, Хе-р1 и Хе-р2 проведены на основании измеренных содержаний ^{132}Xe и изотопных отношений ксенона, выделенного при ступенчатом пиролизе нанодиамаза Orgueil (CI) и Indarch (EH3-4) в работе (Huss, Lewis, 1994a). Используемые для вычислений изотопные составы компонентов ксенона приведены в таблице 1.

Важно подчеркнуть, что изотопные составы исходных компонентов Хе-р1 и Хе-р2 были получены в предположении, что содержания ^{130}Xe в компонентах Хе-НЛ и Хе-Р6 обусловлены только компонентом Хе-Р3. Поэтому ксенон компонентов Хе-р1 и Хе-р2 состоит в основном из ^{124}Xe – ^{126}Xe и ^{134}Xe – ^{136}Xe , которые, как отмечалось выше, были образованы в р- и г-процессах, например, при взрыве сверхновой типа II. При вычислениях учитывалось, что благородные газы в обогащенных алмазом фракциях содержат также Хе-С, изотопы которого образованы в s-процессах нуклеосинтеза, и содержатся в зернах SiC, присутствующих как примеси в небольших количествах в этих фракциях. Вычисления проводились по следующим уравнениям:

$$X + Z + Y + V = \left[^{132}\text{Xe} \right]_m; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \left(^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{P3}} \times X + \left(^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{S}} \times V = \\ = \left(^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_m \times \left[^{132}\text{Xe} \right]_m; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \left(^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{P3}} \times X + \left(^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{pr2}} \times Z + \\ + \left(^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{pr1}} \times Y + \left(^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{S}} \times V = \\ = \left(^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_m \times \left[^{132}\text{Xe} \right]_m; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \left(^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{P3}} \times X + \left(^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{pr2}} \times Z + \\ + \left(^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{pr1}} \times Y + \left(^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_{\text{S}} \times V = \\ = \left(^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} \right)_m \times \left[^{132}\text{Xe} \right]_m; \end{aligned} \quad (4)$$

где переменные X, Z, Y, V – это содержания ^{132}Xe компонентов Хе-Р3, Хе-р2, Хе-р1 и Хе-С, соответственно. Индексы P3, pr2, S и pr1 относятся к изотопному составу компонентов ксенона (табл. 1), а индекс m – к измеренным содержаниям ^{132}Xe и изотопным отношениям ксенона при пиролизе сепаратов метеоритов в работе (Huss, Lewis, 1994a).

Вычисления содержаний выделенных компонентов ксенона для каждой температурной ступе-

ни пиролиза проводились путем нормирования уравнений (1–4) к измеренным изотопным отношениям $^{130, 134, 136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ для данной ступени в работе (Huss, Lewis, 1994a). При вычислениях содержаний компонентов ксенона нами использовались изотопные составы этих компонентов без их погрешностей. Это связано с тем, что эти составы должны быть постоянными не зависимо от температуры их выделения при пиролизе алмазных фракций и типа метеоритов, из которых эти фракции были выделены. Вместе с тем измеренные изотопные отношения Xe, использованные для нормирования вышеприведенных уравнений (1–4), привлекались с их погрешностями по данным (Huss, Lewis, 1994a) для обогащенных наноалмазом фракций метеоритов Orgueil (CI) и Indarch (EH3-4).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из данных в табл. 1 следует, что значения отношений $^{124}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ для компонента Xe-pr1 выше, чем для Xe-pr2 на $(2.7 \pm 0.2)\%$, а для отношения $^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ это превышение составляет $(14.4 \pm 0.3)\%$. Согласно модели Отта (Ott, 1996) наблюдаемые различия связаны с разными периодами полураспада радиоактивных предшественников ^{124}Xe , ^{134}Xe и ^{136}Xe . Согласно этой модели различия между изотопными составами Xe-pr1 и Xe-pr2 обусловлены ограничением продолжительности образования изотопов Xe в результате распада их радиоактивных предшественников с момента взрыва сверхновой до их захвата. На основании периодов полураспада и содержаний радиоактивных предшественников ксенона расчеты временных интервалов образования компонентов Xe-pr2 и Xe-pr1 показали, что они равны 1.89 и 2.17 ч, соответственно, при взрыве одной из сверхновой II типа. Отметим, что выявленная Оттом (Ott, 1996) проблема несоответствия времени образования аномальной компоненты Xe-HL с величиной отношения $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ в этом компоненте остается также и в компоненте Xe-pr1. Решение указанной проблемы находится вне рамок данной статьи. Возможно также, что компоненты Xe-pr1 и Xe-pr2 были образованы при взрыве разных сверхновых II типа (Gilmour et al., 2005). Источником популяции зерен Xe-P3 является, вероятно, молекулярное облако (например, Huss, Lewis, 1994a) и основными факторами образования зерен наноалмаза могут быть ультрафиолетовое излучение и ударные волны. Вариации вычисленных содержаний ^{132}Xe компонентов Xe-P3, Xe-pr1, Xe-pr2 и Xe-S, выделенных при ступенчатом пиролизе обогащенных наноалмазом фракций Orgueil (CI) и Indarch (EH3-4), представлены графически (рис. 1).

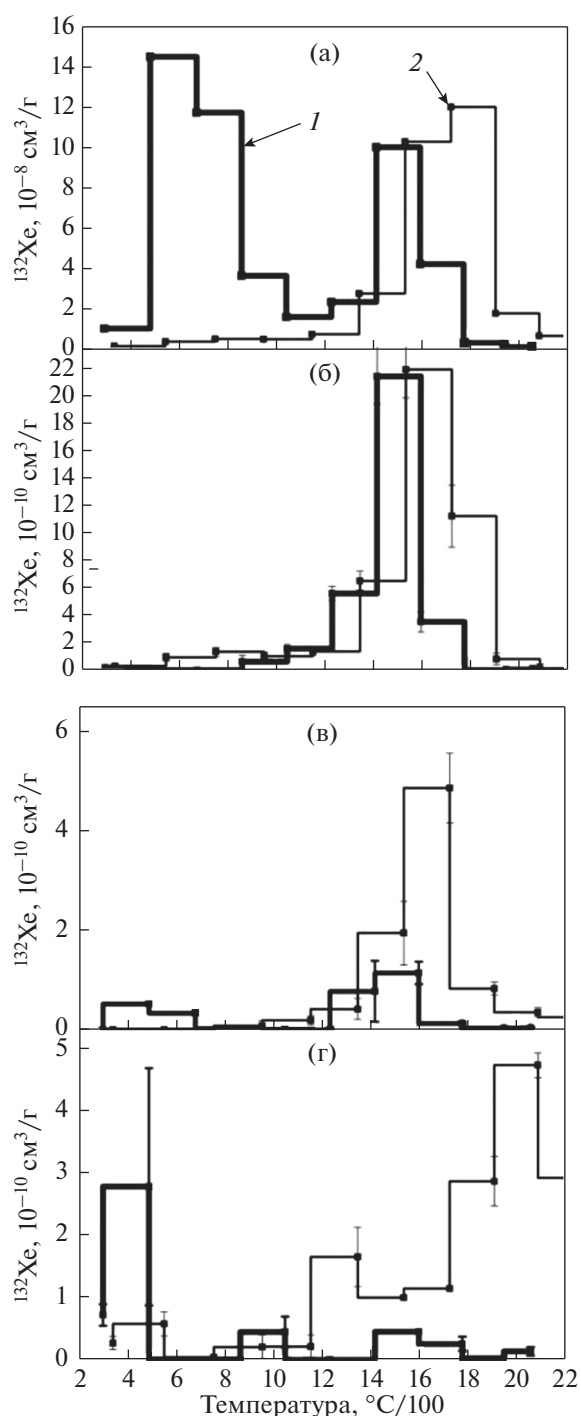


Рис. 1. Вычисленные содержания ^{132}Xe в компонентах ксенона в обогащенных наноалмазом фракциях Orgueil и Indarch. Обозначения: 1 – Orgueil, 2 – Indarch; а, б, в, г – компоненты Xe-P3, Xe-pr1, Xe-pr2, Xe-S.

На этом рисунке, также как и на остальных (см. ниже), вычисленные содержания компонентов ксенона, для которых ошибки вычислений превышают их значения, приведены без их погрешностей. Суммарные значения ^{132}Xe для всех компонентов приведены в табл. 2.

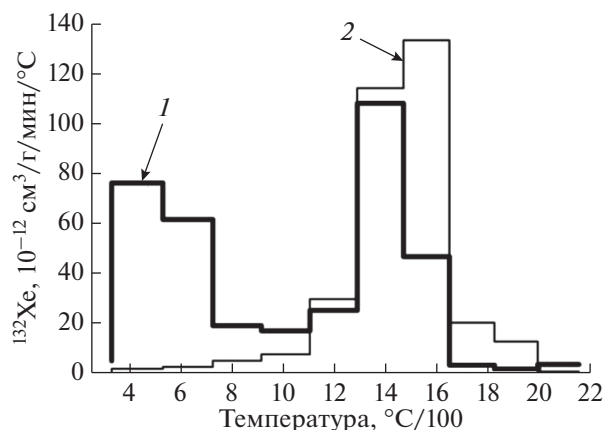


Рис. 2. Гистограммы дифференциальных выделений ^{132}Xe компонента Xe-P3, вычисленного для обогащенных наноалмазом фракций Orgueil и Indarch.: 1 – Orgueil, 2 – Indarch. Погрешности вычислений содержаний Xe-P3 на каждой ступени пиролиза в основном не превышают 1% от приведенных значений.

Здесь приведены также содержания всех изотопов ксенона для каждого компонента. Из приведенных данных можно видеть, что содержание Xe-P3 значительно превышает содержания других компонентов в алмазных фракциях обоих метеоритов (табл. 2).

Кинетика выделения

возможных исходных компонентов ксенона

Ступенчатый пиролиз обогащенных наноалмазом фракциях метеоритов Orgueil и Indarch в работе (Huss, Lewis, 1994a) был проведен при почти одинаковых условиях, а именно: температурный интервал ступеней пиролиза (около 185°C) и продолжительность нагрева на каждой ступени (10 мин – до 800°C , 5 мин – от 800 до 1800°C и 3 мин – выше 1800°C) (Huss, Lewis, 1994a). На основании полученных при этом данных анализ ги-

Таблица 2. Вычисленные содержания ^{132}Xe и суммы всех изотопов компонентов ксенона ($10^{-8} \text{ см}^3/\text{г}$)

Изотопы	Xe-P3	Xe-pr1	Xe-pr2	Xe-S	Сумма
Orgueil (CI), $^{132}\text{Xe} = 49.8^*$					
^{132}Xe	49.299	0.3232	0.02586	0.05163	49.7
$^{124-136}\text{Xe}$	187.36	8.83	2.368	0.1047	198.67
Indarch (EH3-4), $^{132}\text{Xe} = 30.91^*$					
^{132}Xe	30.203	0.46612	0.08833	0.1572	30.91
$^{124-136}\text{Xe}$	114.78	12.735	8.09	0.3188	135.92

* Измеренные общие содержания ^{132}Xe в обогащенных наноалмазом фракциях метеоритов по данным в Huss, Lewis, 1994a.

стограмм дифференциальных выделений вычисленных нами содержаний компонентов Xe-P3, Xe-pr1, Xe-pr2, а также Xe-S для обогащенных наноалмазом этих фракций (рис. 2, 3, 4) показал следующее:

1. Использование компонентов Xe-pr1 и Xe-pr2 вместо компонентов Xe-HL и Xe-P6e привело к следующему расположению температур максимумов выделения этих компонентов, а также Xe-P3 (рис. 2, 3, 4). При температуре выше 1000°C , т.е. при начале интенсивной графитизации зерен наноалмаза, температуры максимумов скорости выделения компонентов Xe-P3 и Xe-pr1 из Orgueil совпадают, и они меньше, чем таковые для Xe-pr2. Такая же картина наблюдается для Xe-HL и Xe-P3 при пиролизе наноалмаза метеорита Orgueil (Huss, Lewis, 1994b). Для Indarch наблюдается другая картина, здесь температура максимума выделения Xe-P3 совпадает с Xe-pr2 и эта температура выше, чем таковая для Xe-pr1. Наблюдаемые различия в температурах максимумов выделения компонентов ксенона в таких разных метеоритах по термальной истории как Orgueil и Indarch указывают на то, что компоненты ксенона находятся в индивидуальных популяциях зерен наноалмаза с разной термо-окислительной стабильностью. Меньшая термостабильность аномальных компонентов Xe-pr1 относительно Xe-pr2 следует также из уменьшения величин отношения $(\text{Xe-pr1})/(\text{Xe-pr2})$, которые равны 3.30 ± 1.14 и 1.54 ± 0.20 для алмаза Orgueil и Indarch (табл. 2).

2. Относительная доля выделенного Xe-pr2 до температуры максимума из Orgueil существенно выше, чем из Indarch (50.0 и 28.7%, соответственно). Это превышение показывает, что, вероятно, некоторые зерна с Xe-pr2 в Orgueil имеют более низкую температуру графитизации из-за более высокой дефектности, обусловленной процессами окисления при метаморфизме. Поэтому наблюдаемое самое низко температурное выделение Xe-pr2 (около 680°C) (рис. 3) является наиболее вероятно результатом графитизации наиболее дефектных зерен и/или поверхностной части этих зерен.

3. Более высокая температура выделения основной доли Xe-pr2, чем Xe-pr1 из обогащенных наноалмазом фракций Orgueil и Indarch может быть обусловлена тем, что первая содержится в зернах наноалмаза с менее дефектной кристаллической решеткой. На рис. 3 можно видеть, что в температурном интервале выделения основного количества Xe-pr2 наблюдается выделение Xe-S из обоих метеоритов (рис. 3 и 4). Существенно отметить, что для Indarch резкое увеличение концентрации выделения Xe-S в ступени выше 1650°C практически не сопровождается таковым для Xe-pr2. Почти такая же картина наблюдается и для Orgueil, а именно, после 1600°C содержание

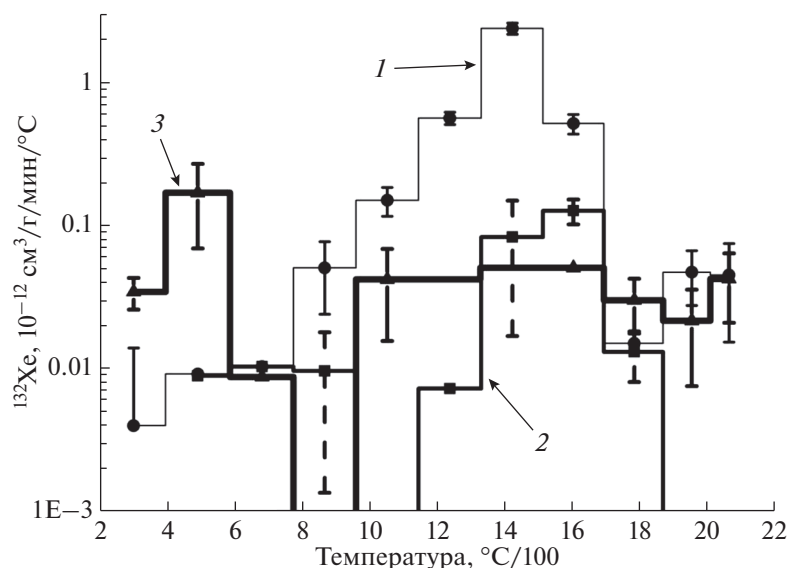


Рис. 3. Гистограммы дифференциальных выделений ^{132}Xe компонентов ксенона, вычисленных для обогащенных на-ноалмазом фракций Orgueil. Обозначения: 1, 2, 3 – компоненты Xe-pr1, Xe-pr2, Xe-S. Погрешности вычислений содержания компонентов ксенона, превышающих их величину на рис. 3, а также рис. 4, не приведены.

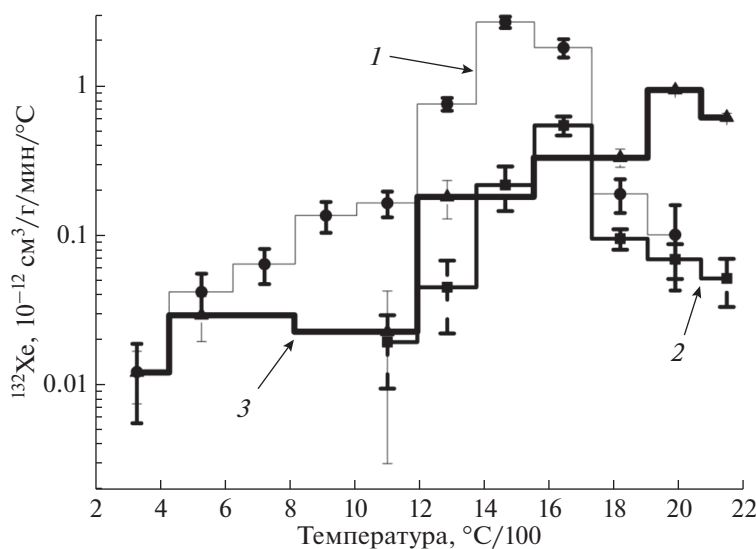


Рис. 4. Гистограммы дифференциальных выделений ^{132}Xe компонентов ксенона, вычисленных для обогащенных на-ноалмазом фракций Indarch. Обозначения – см. на рис. 3.

Xe-pr2 также почти отсутствует при увеличенном содержании Xe-S, хотя и в меньшей степени, чем для Indarch. Здесь важно отметить следующее. Все обогащенные алмазом фракции метеоритов, исследованные в работе (Huss, Lewis, 1994a), в том числе Orgueil и Indarch, данные которых мы использовали, были выделены из коллоидно-подобной взвеси, полученной в результате диспергирования HF–HCl остатков вещества метеоритов в слабо щелочном растворе. Такая сепарация

позволяет отделять зерна алмаза от относительно крупнозернистых кислотостойких остатков. По данным (Huss, Lewis, 1994a) в обогащенных алмазом фракциях также наблюдаются $^{22}\text{Ne-E}$ и Xe-S, что свидетельствует о наличии зерен SiC, которые из за нахождения в коллоидно-подобной взвеси должны иметь крайне малые размеры. По данным для Indarch на рис. 3 можно видеть, что скорости выделения Xe-S в температурных интервалах до 1650°C и после 1650°C резко различны (в

последующем – низкотемпературные и высокотемпературные части пиролиза, соответственно). Аналогичная картина выделения наблюдается и для Orgueil. Вероятно, что зерна SiC, выделенные из коллоидно-подобной взвеси, по их размерам и по концентрациям Xe-S можно разделить на две части – на “мелкозернистые”, из которых десорбция Xe-S происходит до 1650°C, и “грубозернистые” – выше 1650°C.

Важно отметить, что зерна SiC, образованные при взрыве сверхновой II типа и обозначенные как зерна типа SiC-X, были обнаружены в кислотно нерастворимом остатке метеорита Murchison (CM2) (см. например, Hoppe et al., 2019). Имеются ли зерна типа SiC-X в обогащенных нанодиамазом фракциях Orgueil и Indarch и содержат ли они или нет Xe-pr2 или Xe-pr1 – все эти вопросы являются открытыми из-за больших погрешностей вычисленных содержаний Xe-S на данном этапе исследования. Резкие различия кинетики выделения Xe-S из алмазных фракций (рис. 3 и 4) свидетельствует о резком различии термостабильности зерен SiC в окислительных и восстановительных условиях при термальном метаморфизме родительских тел этих метеоритов. Отсутствие резкого уменьшения содержания Xe-S в мелко зернистых зернах SiC по сравнению с крупными зернами в алмазной фракции Orgueil можно объяснить их сильной экранировкой веществом матрицы. Влияние процессов окисления на “мелкие зерна” SiC все же проявилось в появлении наиболее низкотемпературного выделения Xe-S в Orgueil с максимумом при 490°C (рис. 3). Отсутствие этих низкотемпературных выделений компонентов ксенона из Indarch свидетельствует либо о разрушении наиболее дефектных зерен SiC, либо о десорбции ксенона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ вычисленных содержаний компонентов Xe-pr1 и Xe-pr2, использованных вместо Xe-NL и Xe-P6, а также Xe-P3 и Xe-S в обогащенных нанодиамазом фракциях метеоритов Orgueil (CI) и Indarch (EH3-4), показал следующее.

1. Компоненты Xe-pr1 и Xe-pr2, а также Xe-P3, наиболее вероятно, находятся в индивидуальных популяциях зерен нанодиамаза с разной термоокислительной стабильностью.

2. Выделение низко температурного Xe-S (около 490°C) из метеорита Orgueil показывает, что процессы окисления в родительских телах метеоритов приводят к дефектности некоторой доли зерен SiC больше, чем зерен нанодиамаза и, тем самым, к более низкой температуре выделения газов при пиролизе в лабораторных условиях.

3. Различия между компонентами Xe-pr1 и Xe-pr2 по значениям изотопных отношений $^{124}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ и $^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ могут быть объяснены на основании модели Отта (Ott, 1969) ограничением продолжительности образования изотопов ксенона в результате распада их радиоактивных предшественников с момента взрыва сверхновой до их захвата фазами носителями. В этом случае эти интервалы времени образования для Xe-pr2 равны 1.89 ч, тогда как для Xe-pr1 – 2.17 ч. Возможно, что фазы носители с компонентами Xe-pr1 и Xe-pr2 были образованы в различных по продолжительности существования и химическим составам турбулентных зонах смешения фрагментов внешних и внутренних слоев одной из сверхновой II типа при ее взрыве. Популяция зерен с почти изотопно нормальной компонентой Xe-P3 была образована, вероятно, в молекулярном облаке, содержащем продукты нуклеосинтеза различных изотопов ксенона.

Таким образом, успешное использование аномальных компонентов Xe-pr1, Xe-pr2, а также почти изотопно нормальной компоненты Xe-P3 при анализе компонентного состава ксенона в нанодиамазе метеоритов Orgueil (CI) и Indarch (EH3-4), показало, что происхождения компонентов ксенона можно ограничить двумя астрофизическими источниками, а именно, одной из сверхновых II типа и молекулярным облаком. При этом фазами носителями всех этих компонентов являются, наиболее вероятно, индивидуальные популяции нанозерен алмаза, различающиеся степенью дефектности их кристаллической решетки.

Авторы признательны рецензентам А.Б. Верховскому и В.А. Дорофеевой за важные замечания, учет которых позволил существенно улучшить статью.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 137-2019-0002 “Минералого-геохимические и космохимические проблемы образования, дифференциации и эволюции внеземного вещества” института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Фисенко А.В., Семенова Л.Ф. (2020) Нанодиамаз метеоритов: альтернативный состав компонентов ксенона. *Астрономический вестник* **54**, (3), 278-288.
- Clayton D.D. (1989) Origin of heavy xenon in meteoritic diamonds. *Astrophys J.* **340**, 613-619.
- Gilmour J.D., Verchovsky A.B., Fisenko A.V., Holland G., Turner G.V (2005) Xenon isotopes in size separated nanodiamonds from Efremovka: $^{129}\text{Xe}^*$, Xe-P3, and Xe-P6. *Geochim. Cosmochim. Acta* **69**, 4133-4148.
- Heymann D., Dziczkaniec M. (1979) Xenon from intermediate zones of supernovae. *Proc. 10th Lunar and Planetary Science Conf., Houston 1943-1959.*

- Hoppe P., Stancliffe R.J., Pignatari M., Amari S. (2019) Isotopic Signatures of Supernova Nucleosynthesis in Presolar Silicon Carbide Grains of Type AB with Supersolar $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ Ratios. *Astrophys. J.* **887**, 1-10.
- Howard W.M., Meyer B.S., Clayton D.D. (1992) Heavy-element abundances from a neutron burst that produces Xe-H. *Meteoritics* **27**, 404-412.
- Huss G.R., Lewis R.S. (1994a) Noble gases in presolar diamonds I: Three distinct component and their implication for diamond origins. *Meteoritics* **29**, 791-810.
- Huss G.R., Lewis R.S. (1994b) Noble gases in presolar diamonds II: component abundances reflect thermal processing. *Meteoritics* **29**, 811-829.
- Lewis R.S., Anders E., Draine B.T. (1989) Properties, detectability and origin of interstellar diamonds in meteorites. *Nature* **339**, 117-121.
- Lewis R.S., Amari S.A., Anders E. (1994) Interstellar grains in meteorites. II. SiC and its noble gases. *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**, 471-494.
- Kouchi A., Nakano H., Kouchi A., Nakano H (2005) Novel routes for diamond formation in interstellar ices and meteoritic parent bodies. *Astrophys. J.* **626**, 129-132.
- Ott U. (1996) Interstellar diamond xenon and time scales of supernova ejecta. *Astrophys. J.* **463**, 344-348.
- Rayet M., Arnold M., Hashimoto M., Prantzos N., Nomoto K. (1995) The p-process in type II supernovae. *Astron. Astroph.* **298**, 517-527.
- Thielemann F.K., Eichler M., Panov I.V., Wehmeyer B. (2017) Neutron star mergers and nucleosynthesis of heavy elements. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **67**, 253-274.