

УДК 550.42

НАНОАЛМАЗ МЕТЕОРИТОВ: АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СОСТАВ КОМПОНЕНТОВ КСЕНОНА

© 2020 г. А. В. Фисенко^a, *, Л. Ф. Семенова^a

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, Москва, Россия

*e-mail: anat@chngnet.ru

Поступила в редакцию 12.11.2019 г.

После доработки 13.12.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Содержания основных компонентов ксенона – Хе-Р3, Хе-Р3(fr), Хе-Р6 и компонента Хе-рг вместо Хе-НЛ – впервые вычислены для наноалмаза метеоритов Orgueil (CI), Tieschitz (H3.6) и Indarch (EH3-4). Компонент Хе-рг – избыточная доля изотопов ксенона в компоненте Хе-НЛ относительно Хе-Р3(fr) и в основном состоит из изотопов ¹²⁴, ¹²⁶, ¹³⁴, ¹³⁶Хе, образующихся в р- и г-процессах нуклеосинтеза при взрыве сверхновой II типа. Анализ полученных данных показал следующее. (1) Основной компонент Хе в наноалмазе – Хе-Р3(fr), и максимум его выделения при пиролизе, так же как Хе-рг и Хе-Р6, – высокотемпературный (>1000°C), независимо от петрологического типа метеоритов. (2) Относительное содержание компонента Хе-рг в наноалмазе Indarch, наиболее обогащенном аномальным компонентом ксенона, равно около 15% от общего содержания ксенона в алмазе этого метеорита, что существенно меньше содержания компонента Хе-НЛ – около 87%. (3) Компоненты ксенона содержатся в индивидуальных популяциях зерен алмаза с разной термо-окислительной стабильностью. Полученные нами и в статье (Huss, Lewis, 1994b) данные о содержаниях и кинетике выделения компонентов ксенона в наноалмазе метеоритов на основании изотопных составов Хе-рг и Хе-НЛ, соответственно, наиболее вероятно показывают предельные их значения. Предполагается, что реальные свойства компонентов ксенона подобны полученным при использовании для вычислений компонента Хе-рг, принимая во внимание данные о изотопном составе углерода во фракциях зерен наноалмаза метеорита Allende (Lewis и др., 2019).

Ключевые слова: наноалмаз метеоритов, состав компонентов ксенона, изотопный состав ксенона в наноалмазе

DOI: 10.31857/S0320930X20030044

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основными компонентами благородных газов в наноалмазе метеоритов являются компоненты Р3, Р6 и НЛ, различающиеся по изотопным составам газов, температурой выделения и содержаниями (Huss, Lewis, 1994a; 1994b). Изотопные составы ксенона этих компонентов (Хе-Р3, Хе-Р6 и Хе-НЛ, соответственно) были определены на основании корреляционных зависимостей между измеренными изотопными отношениями Хе в наноалмазе метеоритов различных химических классов и петрологических типов (Huss, Lewis, 1994a). При этих определениях отношение ¹³⁶Хе/¹³²Хе было принято равным 0.31 для компонентов Хе-Р3 и Хе-Р6 и 0.70 для Хе-НЛ. В результате этого было получено, что Хе-Р3 и Хе-Р6 имеют почти “нормальные” изотопные составы, т.е. они подобны солнечному составу ксенона, но несколько различны между собой, тогда как компонент Хе-НЛ – изотопно-аномальный

из-за резкого обогащения легкими и тяжелыми изотопами. Одновременное обогащение компонента Хе-НЛ изотопами ¹²⁴, ¹²⁶Хе и ¹³⁴, ¹³⁶Хе обусловлено некоторой долей этих изотопов, образованных, наиболее вероятно, при взрыве сверхновой II типа. Источником изотопов ¹²⁴, ¹²⁶Хе предполагается р-процесс (фоторасщепление) во внутренних оболочках сверхновой (Rayet и др., 1995), тогда как изотопы ¹³⁴, ¹³⁶Хе образуются при быстром процессе захвата нейтронов (г-процессе) при “мини г-процессе” в С- и Не-оболочках сверхновой (например, (Heymann, Dziczkaniec, 1979; Clayton, 1989; Howard и др., 1992). Избытки всех тяжелых изотопов (Хе-Н) компонента Хе-НЛ могли быть образованы также при классическом г-процессе при взрыве сверхновой, но с ограниченным временем образования изотопов Хе от их радиоактивных предшественников (Ott, 1969). Возможны и другие астрофизические источники изотопов Хе-НЛ. Предполагается, например, что образова-

ние почти всех обогащенных нейтронами изотопов могло произойти в г-процессе при слиянии (поглощении) нейтронных звезд (Thielemann и др., 2017). Тем не менее сверхновая II типа как единый источник избыточных изотопов компонента Хе-НЛ и содержащих их зерна наноалмаза все же предпочтительна. Тем более, до настоящего времени не удается разделить легкие и тяжелые избытки изотопов Хе между собой. Изотопы компонента Хе-НЛ 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 его образование в г-процессе блокируется стабильным изотопом ^{130}Te . Таким образом, Хе-НЛ – это смесь изотопов Хе, образованных в разных процессах нуклеосинтеза и астрофизических источниках. Общепринято, что Хе-НЛ – это смесь “нормального” по изотопному составу ксенона с дополнительной долей изотопов ксенона, образованных в основном в r- и g-процессах нуклеосинтеза при взрыве сверхновой II типа (далее эта доля изотопов обозначена как компонент Хе-рг). Поэтому изотопный состав компонента Хе-рг можно определить, вычитая из состава Хе-НЛ его изотопно-“нормальную” составляющую, нормируя ее к содержанию всего ^{130}Xe . Изотопный состав “нормального” ксенона принимается равным, например, составу солнечного Хе (Ott, 1996) или Хе-РЗ (Huss и др., 2008). Очевидно, что Хе-рг, как один из субкомпонентов Хе-НЛ, по изотопному составу является предельно возможным. Может ли и при каких условиях после взрыва сверхновой образоваться индивидуальная популяция зерен наноалмаза с Хе-рг – открытые вопросы. Возможно, например, что предшественником этих зерен была углеродная фаза с сорбированными изотопами компонента Хе-рг. Тем не менее использование компонента Хе-рг при вычислениях содержаний компонентов ксенона в наноалмазе метеоритов позволит определить также предельно возможные их содержания и кинетику выделения при ступенчатом пиролизе.

В настоящее время анализ вычисленных содержаний компонентов Хе-РЗ, Хе-Р6 и Хе-НЛ и кинетики их выделения при ступенчатом пиролизе наноалмаза различных метеоритов показал следующие основные их особенности (Huss, Lewis, 1994b). Выделение Хе-РЗ является бимодальным с максимумами выделения около 500°C и $1100\text{--}1300^\circ\text{C}$. Компоненты Хе-НЛ и Хе-Р6 – высокотемпературные с максимумами выделения в интервале $1100\text{--}1300^\circ\text{C}$, причем Хе-Р6 несколько более высокотемпературный, чем Хе-НЛ. С уве-

личением степени термального метаморфизма родительских тел метеоритов содержание компонента Хе-РЗ, особенно его низкотемпературной доли, резко уменьшается. Так, например, в наноалмазе метеоритов Allende (CV3.2) и Indarch (ЕНЗ-4) компонента Хе-РЗ практически нет. Вместе с тем, реальны ли эти особенности компонентов ксенона – остается открытым вопросом из-за неопределенности изотопного состава компонентов Хе, например, Хе-НЛ. Его состав, как отмечалось выше, был идентифицирован при значении отношения $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} = 0.70$, ограничивающим измеренные данные на трех изотопных графиках для Хе в наноалмазе различных метеоритов. Очевидно, что при другом значении этого отношения изотопный состав Хе-НЛ и, тем самым, содержания всех компонентов Хе, изменятся.

В данной работе приведены содержания компонентов ксенона, вычисленные при использовании изотопного состава Хе-рг в наноалмазе метеоритов таких разных химических классов и петрологических типов как Orgueil (CI), Tieschitz (НЗ.6) и Indarch (ЕНЗ-4). Цель этих вычислений: сопоставление полученных содержаний компонентов ксенона и кинетики их выделения с такими при использовании компонента Хе-НЛ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЙ КОМПОНЕНТОВ КСЕНОНА В НАНОАЛМАЗЕ МЕТЕОРИТОВ

Вычисление содержаний компонентов Хе мы проводили, принимая во внимание, что в обогащенных наноалмазом фракциях различных метеоритов имеется некоторая доля благородных газов, фазой носителем которых являются, наиболее вероятно, зерна SiC (Huss, Lewis, 1994b). Поэтому в использованную ниже систему уравнений были введены параметры, учитывающие вклад ксенона (обозначен как Хе-S) от зерен SiC. Для вычислений использована следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} X + Z + Y + V &= [^{132}\text{Xe}]_m (^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{P3}} X + \\ &+ (^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{P6}} Z + (^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_S V = \\ &= (^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_m [^{132}\text{Xe}]_m (^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{P3}} X + \\ &+ (^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{P6}} Z + (^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{Pr}} Y + \\ &+ (^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_S V = (^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_m [^{132}\text{Xe}]_m \times \\ &\times (^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{P3}} X + (^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{P6}} Z + \\ &+ (^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{Pr}} Y + (^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_S V = \\ &= (^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_m [^{132}\text{Xe}]_m, \end{aligned}$$

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

Компонент	$\frac{^{124}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{126}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{128}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{129}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{130}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{131}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{134}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{136}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$
Хе-НЛ ¹	0.842 ± 9^3	0.569 ± 8	9.05 ± 6	105.6 ± 2	15.44 ± 3	84.42 ± 13	63.61 ± 13	$\equiv 70$
Хе-Р3 ¹	0.451 ± 6	0.404 ± 4	5.06 ± 2	104.2 ± 4	15.91 ± 2	82.32 ± 10	37.70	$\equiv 31.00$
Хе-Р6 ¹	0.438 ± 25	0.444 ± 28	8.90 ± 20	111.4 ± 8	16.60 ± 11	82.14 ± 47	32.91 ± 50	$\equiv 31.00$
Хе-S ²	0	0.033 ± 19	21.59 ± 14	11.8 ± 1.1	48.26 ± 42	18.6 ± 1.2	2.22 ± 53	$\equiv 0.34$
Хе-Р3(fr)	0.415	0.380	7.74	101.1	15.59	81.51	38.45	32.23
Хе-рг	43.35	19.29	139.5	553.4	$\equiv 0$	374.80	2570	3833

¹ Huss, Lewis, 1994a; ² Lewis и др., 1994; ³ ошибки относятся к последним значащимся цифрам.

где переменные X, Z, Y, V – содержания ^{132}Xe -Р3 или ^{132}Xe -Р3(fr), ^{132}Xe -Р6, ^{132}Xe -рг и ^{132}Xe -S, соответственно. Подстрочные индексы Р3, Р6, S и рг относятся к изотопным составам компонентов ксенона, тогда как m – к содержаниям ^{132}Xe и изотопным отношениям ксенона, использованным нами на основании измеренных в (Huss, Lewis, 1994a) при ступенчатом пиролизе наноалмаза метеоритов Orgueil, Tieschitz и Indarch.

Использованные изотопные составы компонентов ксенона для вычислений приведены в табл. 1.

Отметим, что при имплантации благородных газов в наноалмаз детонационного синтеза было выявлено масс-фракционирование изотопов Хе в направлении обогащения тяжелых изотопов относительно легких (Huss и др., 2008). Величина фракционирования составила 0.99%/ат. ед. при 1400°C относительно изотопного состава Хе при 500°C. Поэтому при вычислениях содержаний компонентов Хе в наноалмазе термально метаморфизованных метеоритов Tieschitz и Indarch мы использовали масс-фракционированный Хе-Р3 (0.99%/ат. ед., обозначен как Хе-Р3(fr)), тогда как для алмаза Orgueil (CI) – Хе-Р3 до 1000°C, и Хе-Р3(fr) выше 1000°C (см. ниже). Изотопный состав компонента Хе-рг – результат вычитания из состава Хе-НЛ состав Хе-Р3(fr), полагая, что содержание ^{130}Xe в Хе-НЛ обусловлено только компонентом Хе-Р3(fr).

Почти все использованные для вычислений значения отношений $^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$, $^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ и $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ равны измеренным в пределах $\pm\sigma$, что можно видеть, например, для наноалмазов Orgueil и Indarch (табл. 2). В табл. 2 приведены также содержания ^{132}Xe компонентов ксенона, вычисленные нами и Huss, Lewis (1994b).

Для наноалмаза Orgueil (CI), наиболее обогащенного низкотемпературным компонентом Хе-Р3, как отмечалось выше, вычисления проведены с изотопными составами Хе-Р3 до 1050°C и с Хе-Р3(fr)

выше этой температуры. Заметим, что максимум выделения низкотемпературного Хе-Р3 при пиролизе алмаза Orgueil наблюдается при 480°C (Huss, Lewis, 1994b) и поэтому его возможное масс-фракционирование мы не учитывали.

Все вычисления были проведены при нормировании уравнений к измеренным отношениям $^{130, 134, 136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ без учета погрешностей их измерений. Поэтому полученные содержания компонентов Хе в наноалмазе приведенных выше метеоритов представляют собой один из вариантов возможных их значений. Тем не менее единый способ определения этих содержаний позволил выявить особенности компонентов ксенона при использовании в расчетах компонента Хе-рг вместо Хе-НЛ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании полученных нами содержаний ^{132}Xe компонентов ксенона (табл. 2) и их изотопных составов (табл. 1) были вычислены изотопные отношения $^{124, 129, 131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ (табл. 3).

Подчеркнем, что вычисление отношений $^{124, 129, 131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ проведено на основании содержаний компонентов ксенона, вычисленных при нормировании уравнений к измеренным отношениям $^{124, 130, 134, 136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$. Поэтому наличие равенства между вычисленными и измеренными отношениями $^{124, 129, 131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ зависит от степени смешения избытков легких и тяжелых изотопов ксенона в наноалмазе (см. ниже).

Общий ксенон в наноалмазе метеоритов: содержания компонентов и изотопный состав

Из данных табл. 2 следует, что использование при расчетах компонента Хе-рг вместо Хе-НЛ привело к резкому изменению содержаний компонентов Хе в наноалмазе метеоритов Orgueil и Indarch. Аналогичная картина наблюдается также

Таблица 2. Изотопные отношения ксенона ($^{132}\text{Xe} = 100$) и содержания ^{132}Xe (в $10^{-8} \text{ см}^3/\text{г}$). Курсив – данные Huss, Lewis (1994a; 1994b). Обычный шрифт – вычисления данной работы

$(T, ^\circ\text{C}),$ ^{132}Xe	$\frac{^{130}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{134}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{136}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	Содержания ^{132}Xe компонентов			
				Xe-P3(fr)	Xe-HL, pr	Xe-P6	Xe-S
Orgueil (CI)							
<i>(300)</i>	<i>16.12(6)</i>	<i>38.15(16)</i>	<i>31.65(13)</i>	<i>0.97(35)</i>	<i>0.023(2)</i>	н. д. ¹	<i>0.005(2)</i>
<i>1.00</i>	16.12	38.03	31.65	0.993	0.0002	≤0.001	0.007
<i>(490)</i>	<i>15.98(5)</i>	<i>37.89(9)</i>	<i>31.53(8)</i>	<i>14.30(51)</i>	<i>0.189(30)</i>	н. д.	<i>0.029(29)</i>
<i>14.52</i>	15.98	37.89	31.53	14.070	0.0022	0.420	0.024
<i>(680)</i>	<i>15.89(5)</i>	<i>38.21(10)</i>	<i>31.91(16)</i>	<i>11.44(40)</i>	<i>0.257(16)</i>	н. д.	<i>0.00(23)</i>
<i>11.70</i>	15.91	38.11	31.94	11.140	0.0028	0.562	≤0.001
<i>(865)</i>	<i>15.87(5)</i>	<i>39.35(10)</i>	<i>33.50(10)</i>	<i>3.40(12)</i>	<i>0.232(11)</i>	н. д.	<i>0.00(7)</i>
<i>3.63</i>	15.89	39.35	33.62	3.549	0.00248	0.081	≤0.001
<i>(1050)</i>	<i>15.85(5)</i>	<i>45.32(14)</i>	<i>42.31(20)</i>	<i>1.13(4)</i>	<i>0.455(18)</i>	<i>0.00(3)</i>	<i>0.005(3)</i>
<i>1.59</i>	15.85	45.32	42.43	1.586	0.00478	≤0.001	≤0.001
<i>(1235)</i>	<i>15.54(5)</i>	<i>57.70(18)</i>	<i>60.89(16)</i>	<i>0.58(2)</i>	<i>1.794(64)</i>	<i>0.00(5)</i>	<i>0.007(5)</i>
<i>2.38</i>	15.54	57.59	61.01	2.358	0.0181	≤0.001	0.005
<i>(1420)</i>	<i>15.56(5)</i>	<i>58.24(15)</i>	<i>62.26(16)</i>	<i>1.73(8)</i>	<i>8.19(29)</i>	<i>0.307(52)</i>	<i>0.002(2)</i>
<i>10.22</i>	15.56	58.24	62.26	9.709	0.081	0.415	0.015
<i>(1600)</i>	<i>15.77(5)</i>	<i>52.50(13)</i>	<i>54.76(14)</i>	<i>0.79(5)</i>	<i>2.59(9)</i>	<i>0.871(52)</i>	<i>0.00(1)</i>
<i>4.25</i>	15.77	52.50	54.76	3.383	0.0256	0.833	0.009
<i>(1780)</i>	<i>16.13(12)</i>	<i>48.90(36)</i>	<i>50.38(46)</i>	<i>0.051(3)</i>	<i>0.15(5)</i>	<i>0.095(5)</i>	<i>0.002(1)</i>
<i>0.30</i>	16.13	48.90	50.38	0.200	0.00149	0.096	0.003
<i>(1950)</i>	<i>15.88(24)</i>	<i>51.45(82)</i>	<i>53.59(1.08)</i>	<i>0.030(1)</i>	<i>0.050(2)</i>	<i>0.012(10)</i>	<i>0.0012(2)</i>
<i>0.09</i>	15.88	51.45	53.59	0.067	0.00052	0.022	≤0.001
<i>(2060)</i>	<i>16.09(18)</i>	<i>53.49(55)</i>	<i>56.52(90)</i>	<i>0.015(1)</i>	<i>0.081(3)</i>	<i>0.025(1)</i>	<i>0.0013(2)</i>
<i>0.12</i>	16.09	53.49	56.52	0.093	0.00079	0.024	0.001
Indarch (EH3-4)							
<i>(325)</i>	<i>16.21(22)</i>	<i>54.18(77)</i>	<i>55.91(1.07)</i>	<i>0.047(1)</i>	<i>0.091(1)</i>	н. д.	<i>0.0020(3)</i>
<i>0.14</i>	16.21	54.02	56.10	0.136	0.0009	≤0.001	0.003
<i>(525)</i>	<i>16.03(16)</i>	<i>56.95(51)</i>	<i>59.76(76)</i>	<i>0.088(2)</i>	<i>0.279(3)</i>	н. д.	<i>0.0050(7)</i>
<i>0.37</i>	16.03	56.84	60.21	0.361	0.0028	≤0.001	0.006
<i>(720)</i>	<i>15.53(16)</i>	<i>59.20(52)</i>	<i>63.00(48)</i>	<i>0.094(2)</i>	<i>0.411(5)</i>	<i>0.0001(1)</i>	<i>0.003(1)</i>
<i>0.51</i>	15.53	59.06	63.22	0.505	0.0042	≤0.001	0.001
<i>(910)</i>	<i>15.69(11)</i>	<i>60.28(49)</i>	<i>65.88(51)</i>	<i>0.012(1)</i>	<i>0.434(5)</i>	<i>0.044(1)</i>	<i>0.002(1)</i>
<i>0.49</i>	15.69	60.43	65.40	0.481	0.0043	≤0.001	0.003
<i>(1100)</i>	<i>15.67(6)</i>	<i>60.80(28)</i>	<i>67.14(16)</i>	<i>0.000(2)</i>	<i>0.668(8)</i>	<i>0.063(2)</i>	<i>0.004(1)</i>
<i>0.74</i>	15.67	60.80	67.14	0.593	0.0068	0.140	0.001
<i>(1285)</i>	<i>15.71(5)</i>	<i>61.86(19)</i>	<i>68.23(20)</i>	<i>0.000(8)</i>	<i>2.672(30)</i>	<i>0.139(3)</i>	<i>0.020(6)</i>
<i>2.83</i>	15.71	61.86	68.23	2.490	0.0270	0.299	0.014
<i>(1465)</i>	<i>15.58(3)</i>	<i>61.17(15)</i>	<i>67.30(17)</i>	<i>0.000(32)</i>	<i>9.77(11)</i>	<i>0.747(33)</i>	<i>0.011(21)</i>
<i>10.52</i>	15.58	61.17	67.30	8.987	0.0975	1.438	≤0.001
<i>(1645)</i>	<i>15.73(5)</i>	<i>57.00(14)</i>	<i>62.25(16)</i>	<i>0.000(37)</i>	<i>9.74(12)</i>	<i>2.410(66)</i>	<i>0.024(24)</i>
<i>12.17</i>	15.73	57.00	62.25	8.297	0.0972	3.796	≤0.001
<i>(1820)</i>	<i>16.28(8)</i>	<i>53.93(13)</i>	<i>58.30(26)</i>	<i>0.000(18)</i>	<i>1.279(16)</i>	<i>0.500(19)</i>	<i>0.027(4)</i>
<i>1.81</i>	16.28	53.93	58.30	1.126	0.0128	0.646	0.024

Таблица 2. Окончание

$(T, ^\circ\text{C}),$ ^{132}Xe	$\frac{^{130}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{134}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{136}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	Содержания ^{132}Xe компонентов			
				Xe-P3(fr)	Xe-HL, pr	Xe-P6	Xe-S
(1990)	17.99(8)	51.37(28)	55.88(42)	0.000(7)	0.472(8)	0.181(7)	0.051(1)
0.70	17.99	51.37	55.88	0.373	0.0048	0.277	0.045
(2150)	17.24(8)	53.42(35)	57.85(39)	0.007(6)	0.443(7)	0.147(6)	0.030(1)
0.63	17.24	53.42	57.85	0.407	0.0045	0.191	0.028

¹ н. д. — нет данных.

для наноалмаза Tieschitz. По относительным содержаниям компонентов ксенона в алмазе каждого метеорита (табл. 4) видно, что доля Xe-pr не превышает 15% даже в наноалмазе Indarch — наиболее обогащенном аномальным по изотопному составу ксеноном по данным в (Huss, Lewis, 1994b).

Основную долю ксенона в алмазе этого метеорита, как и в остальных, составляют Xe-P3, Xe-P3(fr) и Xe-P6. Вероятно, при равных концентрациях всех компонентов Xe в зернах наноалмаза основной массой зерен, по крайней мере, содержащих благородные газы, являются популяции зерен, содержащие почти нормальные по изотопному составу компоненты Xe-P3, Xe-P3(fr) и Xe-P6.

Отклонения вычисленных по данным в табл. 2 и 3 изотопных отношений Xe от измеренных для общего Xe в наноалмазе метеоритов показаны на рис. 1.

По оси ординат отложена величина отклонений δ (в ‰), равная $(\frac{(^i\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_c}{(^i\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_m} - 1) \times 1000$, где подстрочные индексы c и m показывают вычисленные и измеренные отношения, соответственно. Из данных на рис. 1 видно следующее.

1. Наибольшие положительные отклонения наблюдаются для легких изотопов Xe в наноалмазе Indarch. Они обусловлены, вероятно, дефицитом легких изотопов Xe в результате диффузионных потерь из алмаза при термальном метаморфизме этого метеорита. Минимальные отклонения для наноалмаза метеорита Orgueil (CI), т.е. для наименее измененного наноалмаза в результате процессов термального метаморфизма, показывают, что полученные содержания компонентов Xe при использовании Xe-pr могут быть реальными в наноалмазе метеоритов.

2. Совпадение вычисленных отношений $^{124}, ^{126}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ с измеренными в пределах $\pm(1-3)\sigma$ при нормировании уравнений к измеренным значениям $^{134}, ^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ в первом приближении свидетельствует о единой смеси избытков $^{124}, ^{126}\text{Xe}$ и $^{134}, ^{136}\text{Xe}$ изотопов. Вероятно, эти изотопы Xe, образующиеся соответственно в р- и г-процессах

нуклеосинтеза при взрыве сверхновой II типа, были имплантированы в зерна наноалмаза одной популяции. Это предположение согласуется с вы-

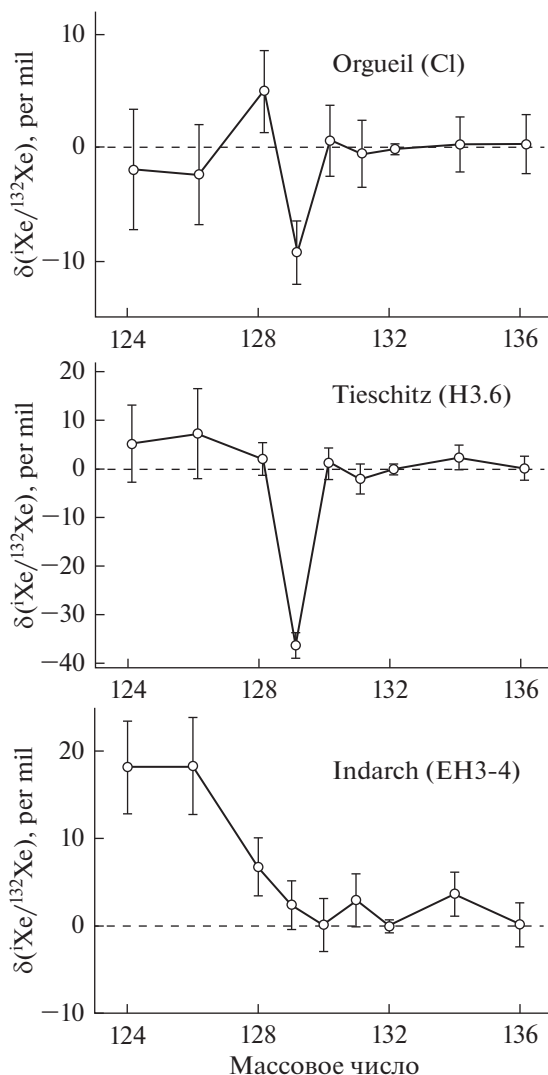


Рис. 1. Отклонения вычисленных изотопных отношений Xe от измеренных для общего ксенона в наноалмазе метеоритов. Погрешности ($\pm\sigma$) обусловлены погрешностями измеренных отношений.

Таблица 3. Изотопные отношения ксенона ($^{132}\text{Xe} = 100$). Курсив – измерения Huss, Lewis (1994a). Обычный шрифт – результаты вычислений с компонентом Xe-pr

$(T, ^\circ\text{C}), ^{132}\text{Xe}$	$\frac{^{124}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{126}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{128}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{129}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$	$\frac{^{131}\text{Xe}}{^{132}\text{Xe}}$
Orgueil (CI)					
<i>(300)</i>	<i>0.479(11)</i>	<i>0.420(8)</i>	<i>8.16(6)</i>	<i>110.6(3)</i>	<i>81.72(43)</i>
1.00	0.458	0.406	8.18	103.7	81.97
<i>(490)</i>	<i>0.460(2)</i>	<i>0.407(2)</i>	<i>8.10(2)</i>	<i>107.9(3)</i>	<i>82.36(25)</i>
14.52	0.456	0.407	8.13	104.3	82.26
<i>(680)</i>	<i>0.460(2)</i>	<i>0.407(3)</i>	<i>8.05(2)</i>	<i>104.6(3)</i>	<i>82.49(25)</i>
11.70	0.461	0.411	8.12	104.7	82.44
<i>(865)</i>	<i>0.481(6)</i>	<i>0.413(3)</i>	<i>8.15(2)</i>	<i>104.0(3)</i>	<i>82.42(25)</i>
3.63	0.480	0.418	8.16	104.7	82.56
<i>(1050)</i>	<i>0.546(8)</i>	<i>0.447(6)</i>	<i>8.31(5)</i>	<i>103.4(3)</i>	<i>82.57(25)</i>
1.59	0.580	0.461	8.45	105.6	83.22
<i>(1235)</i>	<i>0.726(9)</i>	<i>0.512(5)</i>	<i>8.67(3)</i>	<i>102.85(43)</i>	<i>83.22(25)</i>
2.38	0.740	0.524	8.77	104.4	83.61
<i>(1420)</i>	<i>0.762(6)</i>	<i>0.537(3)</i>	<i>8.82(3)</i>	<i>105.0(3)</i>	<i>83.78(25)</i>
10.22	0.756	0.533	8.85	105.0	83.76
<i>(1600)</i>	<i>0.679(5)</i>	<i>0.531(4)</i>	<i>8.80(3)</i>	<i>106.4(3)</i>	<i>83.75(25)</i>
4.25	0.677	0.506	8.79	105.6	83.25
<i>(1780)</i>	<i>0.647(30)</i>	<i>0.471(24)</i>	<i>8.93(9)</i>	<i>105.5(6)</i>	<i>82.85(37)</i>
0.30	0.632	0.492	8.89	105.8	82.60
<i>(1950)</i>	<i>0.593(51)</i>	<i>0.407(38)</i>	<i>8.89(20)</i>	<i>103.7(1.0)</i>	<i>81.95(86)</i>
0.09	0.665	0.504	8.84	105.9	51.45
<i>(2060)</i>	<i>0.726(48)</i>	<i>0.445(37)</i>	<i>9.12(16)</i>	<i>106.5(1.1)</i>	<i>83.01(76)</i>
0.12	0.696	0.514	9.01	105.1	82.80
Indarch (EH3-4)					
<i>(325)</i>	<i>0.623(53)</i>	<i>0.494(43)</i>	<i>8.80(15)</i>	<i>108.2(1.3)</i>	<i>83.22(79)</i>
0.14	0.684	0.495	8.90	102.1	82.02
<i>(525)</i>	<i>0.729(30)</i>	<i>0.478(27)</i>	<i>9.25(15)</i>	<i>110.5(7)</i>	<i>82.75(77)</i>
0.37	0.731	0.517	8.96	103.0	82.64
<i>(720)</i>	<i>0.715(27)</i>	<i>0.506(20)</i>	<i>9.27(10)</i>	<i>111.8(6)</i>	<i>83.23(56)</i>
0.51	0.765	0.535	8.84	104.3	83.78
<i>(910)</i>	<i>0.716(17)</i>	<i>0.497(17)</i>	<i>9.05(10)</i>	<i>110.9(8)</i>	<i>83.40(31)</i>
0.49	0.790	0.545	9.00	104.5	83.64
<i>(1100)</i>	<i>0.775(23)</i>	<i>0.533(17)</i>	<i>8.99(6)</i>	<i>107.7(3)</i>	<i>83.58(43)</i>
0.74	0.817	0.568	9.19	104.2	84.28
<i>(1285)</i>	<i>0.785(10)</i>	<i>0.560(7)</i>	<i>9.03(4)</i>	<i>105.3(3)</i>	<i>84.12(25)</i>
2.83	0.826	0.567	9.19	106.1	84.1
<i>(1465)</i>	<i>0.805(9)</i>	<i>0.559(3)</i>	<i>9.05(3)</i>	<i>106.5(3)</i>	<i>84.15(25)</i>
10.52	0.817	0.565	9.12	106.7	84.33
<i>(1645)</i>	<i>0.760(4)</i>	<i>0.551(3)</i>	<i>9.09(3)</i>	<i>107.3(3)</i>	<i>83.96(25)</i>
12.17	0.766	0.552	9.13	108.1	84.15
<i>(1820)</i>	<i>0.728(14)</i>	<i>0.508(10)</i>	<i>9.22(3)</i>	<i>105.9(3)</i>	<i>82.43(25)</i>
1.81	0.722	0.533	9.27	106.8	82.97
<i>(1990)</i>	<i>0.669(20)</i>	<i>0.473(14)</i>	<i>9.92(10)</i>	<i>99.9(7)</i>	<i>78.11(28)</i>

Таблица 3. Окончание

$(T, ^\circ\text{C}), {}^{132}\text{Xe}$	$\frac{{}^{124}\text{Xe}}{{}^{132}\text{Xe}}$	$\frac{{}^{126}\text{Xe}}{{}^{132}\text{Xe}}$	$\frac{{}^{128}\text{Xe}}{{}^{132}\text{Xe}}$	$\frac{{}^{129}\text{Xe}}{{}^{132}\text{Xe}}$	$\frac{{}^{131}\text{Xe}}{{}^{132}\text{Xe}}$
0.70	0.693	0.514	10.00	102.5	79.72
(2150)	0.675(24)	0.422(19)	9.52(9)	101.8(6)	79.59(39)
0.63	0.713	0.521	9.66	103.5	81.01

водом о единой смеси избытков легких и тяжелых изотопов в Xe-HL (Huss, Lewis, 1994b).

3. Вычисленное отношение ${}^{129}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe}$ значительно ниже измеренного в наноалмазе Tieschitz. Это занижение обусловлено наиболее вероятно тем, что мы не учитывали ${}^{129}\text{Xe}$, образованный в результате радиоактивного распада ${}^{129}\text{I}$ в зернах наноалмаза и сохранность йода в зависимости от степени метаморфизма родительских тел метеоритов (см., например, Fisenko, Semjonova, 2008; Gilmour и др., 2016).

Содержания компонентов и изотопные отношения ксенона, выделенные при ступенчатом пиролизе наноалмаза метеоритов

Гистограммы дифференциальных выделений ${}^{132}\text{Xe}$ основных компонентов в зависимости от температуры пиролиза, полученных по данным в табл. 2 и результатам вычислений для наноалмаза Tieschitz, приведены на рис. 2.

Из данных на рис. 2 видно следующее:

(А) При вычислениях с компонентом Xe-рг выделение значительного количества низкотемпературного Xe-P3 ($<1000^\circ\text{C}$) из наноалмаза наименее термально метаморфизованного метеорита Orgueil (CI) сохраняется. Но при этом наблюдается также высокотемпературное выделение Xe-P3(fr) для наноалмаза всех трех метеоритов, независимо от петрологического типа. Кроме этого, для наноалмаза Orgueil видно существенное выделение низкотемпературного ($<1000^\circ\text{C}$) Xe-P6. “Следы” такого Xe-P6 можно видеть для наноалмаза Tieschitz, но он отсутствует в наноалмазе Indarch. Подобие кинетики выделения низкотемпературных Xe-P3 и Xe-P6 обусловлено, вероятно, одинаковыми положениями атомов Xe этих компонент в кристаллической структуре зерен алмаза.

(Б) Температуры максимумов выделения Xe-P3(fr) подобны таковым для Xe-рг при пиролизе наноалмаза всех метеоритов. Из этого подобия может следовать, что имеется одна (или две, но с равной термостабильностью) популяция зерен наноалмаза, содержащая благородные газы P3 и компонент рг. В этом случае при смешении этих компонентов изотопный состав ксенона должен быть

одинаковым для наноалмаза всех метеоритов при температуре пиролиза выше 1000°C . Этого, однако, не наблюдается, что видно, например, по изменяющейся величине отношения ${}^{136}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe}$ (рис. 3).

Как видно, средневзвешенное отношение ${}^{136}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe}$ увеличивается от 0.626 до 0.735 при переходе от слабо термально метаморфизованного метеорита Orgueil (CI) к сильно метаморфизованному Indarch (EH3-4). Следовательно, разрушение популяции зерен наноалмаза с благородными газами P3 компонента при термальном метаморфизме родительских тел метеоритов происходило в большей степени, чем с компонентом рг. Это различие показывает, что благородные газы этих компонентов содержатся в индивидуальных популяциях зерен алмаза с разной термо-окислительной стабильностью. Отметим, что более высокая величина отношения ${}^{136}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe}$, особенно для алмаза Tieschitz, в начале высокотемпературной области пиролиза наноалмазов (рис. 3) также свидетельствует о разной термостабильности зерен наноалмаза с ксеноном компонентов P3 и рг. Сравнение вычисленных изотопных отношений ксенона с измеренными при ступенчатом пиролизе наноалмаза метеоритов Orgueil, Tieschitz и Indarch проведено только для ${}^{124-129}, {}^{131}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe}$ отношений. Остальные отношения Xe были ис-

Таблица 4. Содержания компонентов Xe (в %) от общего Xe в наноалмазе метеоритов¹

Xe-P3, Xe-P3(fr)	Xe-HL Xe-рг	Xe-P6	Xe-S
Orgueil (CI)			
65.6	31.8	2.5	0.1
89.8	5.4	4.8	0.1
Tieschitz (H3.6)			
4.2	85.9	9.7	0.1
73.4	14.5	11.9	0.1
Indarch (EH3-4)			
0.7	87.1	12.0	0.3
65.9	14.8	19.1	0.2

¹ Обычный шрифт – с компонентом Xe-рг. Курсив – по данным (Huss, Lewis, 1994b).

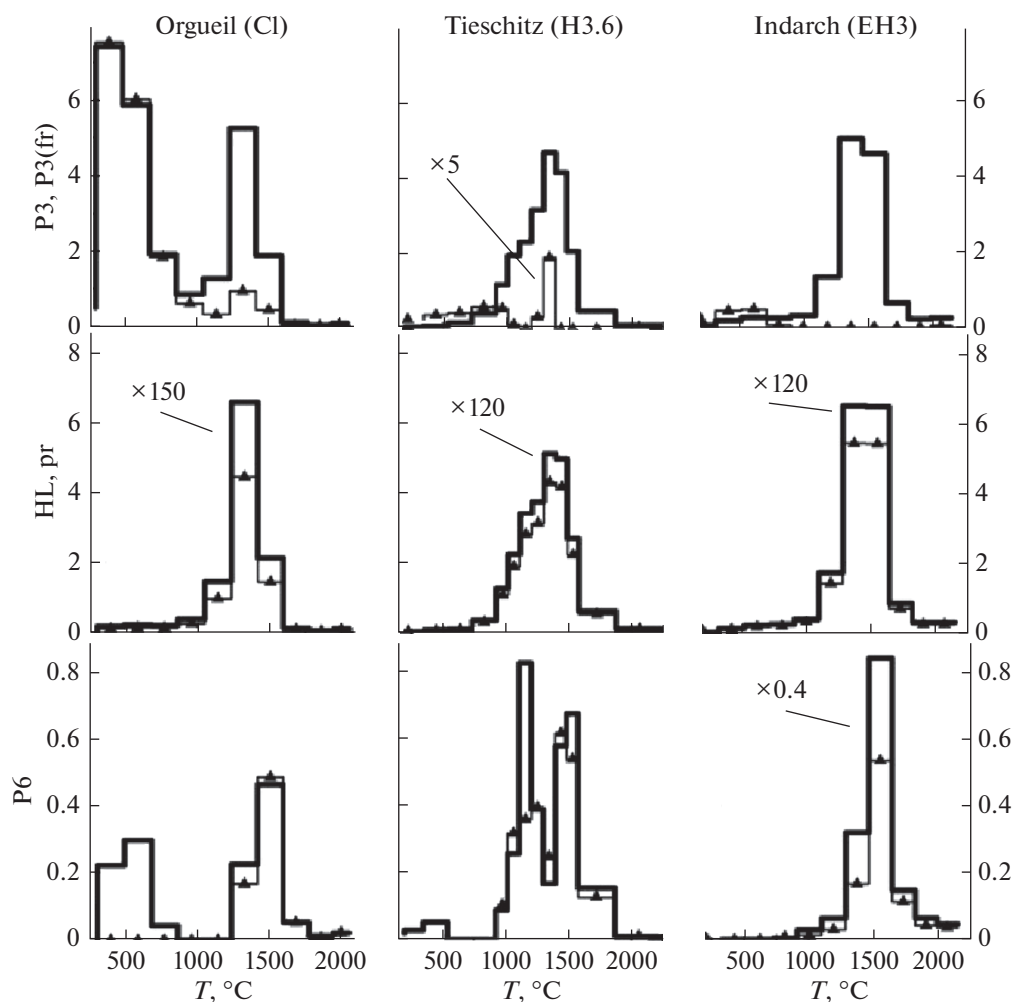


Рис. 2. Гистограммы дифференциальных выделений ^{132}Xe (в $10^{-10} \text{ см}^3/\text{г}/^\circ\text{C}$) компонент ксенона по данным этой работы (жирные линии) и Huss, Lewis (1994b) (тонкие линии с символами).

пользованы в уравнениях (см. выше) и они в большинстве случаев равны измеренным значениям в пределах $\pm\sigma$, как это можно видеть по данным в табл. 2 для наноалмазов Orgueil и Indarch. Гистограммы отклонений (в %) вычисленных отношений $^{124-129}, ^{131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ от измеренных в зависимости от интегрального выхода ^{132}Xe для наноалмаза метеоритов показаны на рис. 4. На рисунке показаны также гистограммы, полученные нами по данным в (Huss, Lewis, 1994a).

Заметим, что в некоторых гистограммах не приведены начальные и/или конечные ступени выделения Xe из-за значительных относительных погрешностей измеренных изотопных отношений ксенона. Из приведенных гистограмм следует, что:

(В) Для наноалмаза Orgueil вычисленные изотопные отношения Xe, особенно при использовании компонента Xe-pr, существенно выше изме-

ренных в интервале 63–70% выделения ^{132}Xe . Температура выделения Xe в этом интервале равна 925–1230 $^\circ\text{C}$ и она соответствует температуре начала интенсивной графитизации зерен наноалмаза. Для наноалмазов Tieschitz и Indarch также наблюдаются повышенные вычисленные значения некоторых изотопных отношений Xe на начальных стадиях выделения основного количества ксенона, начинающегося с температуры пиролиза около 950 $^\circ\text{C}$. Возможно, что графитизирующиеся при этих температурах зерна алмаза, например, наиболее мелкие и/или с дефектной кристаллической структурой, обеднены легкими изотопами Xe относительно тяжелых. Связано ли это обеднение, например, с диффузионными потерями легких изотопов Xe и/или с масс-фракционированием при имплантации компонента Xe-pr – открытый вопрос.

(Г) Гистограммы отклонений вычисленных изотопных отношений Xe по данным этой работы

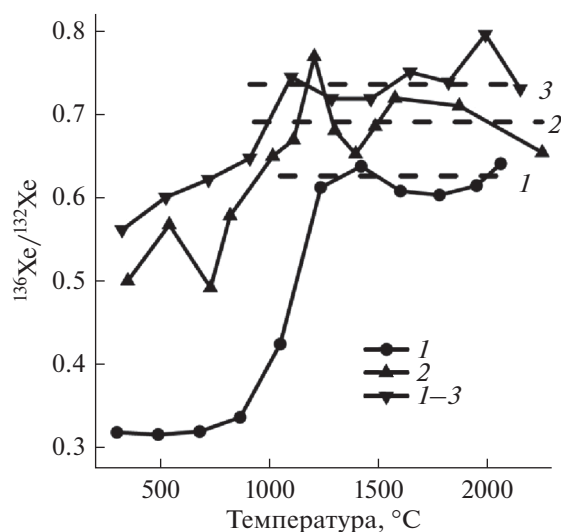


Рис. 3. Изменения отношений $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ для смеси компонентов Xe-rg и Xe-P3(fr). Обозначения: 1 – Orgueil (CI), 2 – Tieschitz (H3.6), 3 – Indarch (EH3-4). Пунктирные линии – средневзвешенные значения отношений $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$.

и (Huss, Lewis, 1994a) от измеренных подобны между собой для наноалмаза таких разных по химическому классу и петрологическому типу метеоритов как Orgueil (CI), Tieschitz (H3.6) и Indarch (EH3-4). Это подобие показывает, что вычисленные содержания компонентов Xe при использовании Xe-rg или Xe-HL могут быть реальными содержаниями в алмазах этих метеоритов в равной степени. Подчеркнем, однако, что эти компонентные составы Xe, как показано выше (см. табл. 4), существенно различаются относительными содержаниями компонентов Xe.

(Д) Вычисленные отношения $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ значительно ниже измеренных в наноалмазе всех метеоритов, причем на начальных стадиях выделения ксенона. Вероятно, радиоактивный ^{129}I , предшественник избыточного ^{129}Xe , содержался, в основном, в поверхностной области зерен наноалмаза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые определены содержания основных компонентов ксенона – Xe-P3, Xe-P3(fr), Xe-P6 и компонента Xe-rg вместо Xe-HL, используя данные Huss, Lewis (1994a) для ксенона в наноалмазе таких метеоритов как Orgueil (CI), Tieschitz (H3.6) и Indarch (EH3-4). Компонент Xe-rg – это избыточная доля изотопов Xe в Xe-HL относительно Xe-P3(fr) и в основном состоит из изотопов $^{124}, ^{126}, ^{134}, ^{136}\text{Xe}$, образующихся в r- и g-процессах нуклеосинтеза при взрыве сверхновой II типа. Анализ вычисленных содержаний компонентов и

изотопных отношений ксенона показал следующее.

1. Основным компонентом Xe в наноалмазе метеоритов является Xe-P3(fr) и температура максимума его выделения, как и компонентов Xe-rg, Xe-P6, выше 1100°C , независимо от петрологического типа метеоритов. Вычисления для наноалмаза Orgueil показали наличие относительно низкотемпературного Xe-P6 ($<1000^\circ\text{C}$). Отсутствие такого Xe-P6 в алмазе термально метаморфизованного метеорита Indarch (EH3-4) является основанием для предположения о подобии процесса(ов) захвата благородных газов компонентов P6 и P3 зернами наноалмаза.

2. Относительные содержания Xe-rg в наноалмазе метеоритов находятся в интервале 5–15% от общего содержания ксенона в алмазе каждого из метеоритов. Этот интервал существенно меньше такого для Xe-HL (32–87%) по данным в (Huss, Lewis, 1994b). Следовательно, при использовании компонента Xe-rg масса зерен наноалмаза с благородными газами компонентов P3(fr) и P6 также будет существенно больше массы зерен с компонентом rg, если концентрации атомов ксенона в зернах наноалмаза одинаковы для всех его компонентов.

3. Для смеси Xe-rg с Xe-P3(fr) средневзвешенные значения отношения $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ в высокотемпературной области пиролиза наноалмазов Orgueil (CI), Tieschitz (H3.6) и Indarch (EH3-4) находятся в ряду 0.626, 0.690 и 0.735, соответственно. Увеличение отношения $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ с увеличением температуры метаморфизма этих метеоритов (в $^\circ\text{C}$: 100, 460 и 630, соответственно (Huss, Lewis, 1994b)) указывает на то, что ксенон компонентов, по крайней мере, rg и P3, содержится в индивидуальных популяциях зерен алмаза с разной термо-окислительной стабильностью.

4. Изотопные отношения $^{124-128}, ^{131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ и $^{130-136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ для всего Xe в наноалмазе, вычисленные на основании полученных содержаний компонентов ксенона с Xe-rg, равны измеренным в пределах ± 18 и $\pm 4\%$, соответственно.

5. Отклонения изотопных отношений Xe, полученных при использовании в расчетах Xe-rg и Xe-HL, от измеренных в основном сопоставимы между собой. Следовательно, содержания компонентов Xe в наноалмазе метеоритов, вычисленные с компонентами Xe-rg или Xe-HL, могут быть реальными в равной степени. При этом, однако, относительные содержания компонентов ксенона существенно различны между собой, что необходимо иметь в виду при разработках моделей образования популяций зерен наноалмаза с разными компонентами благородных газов.

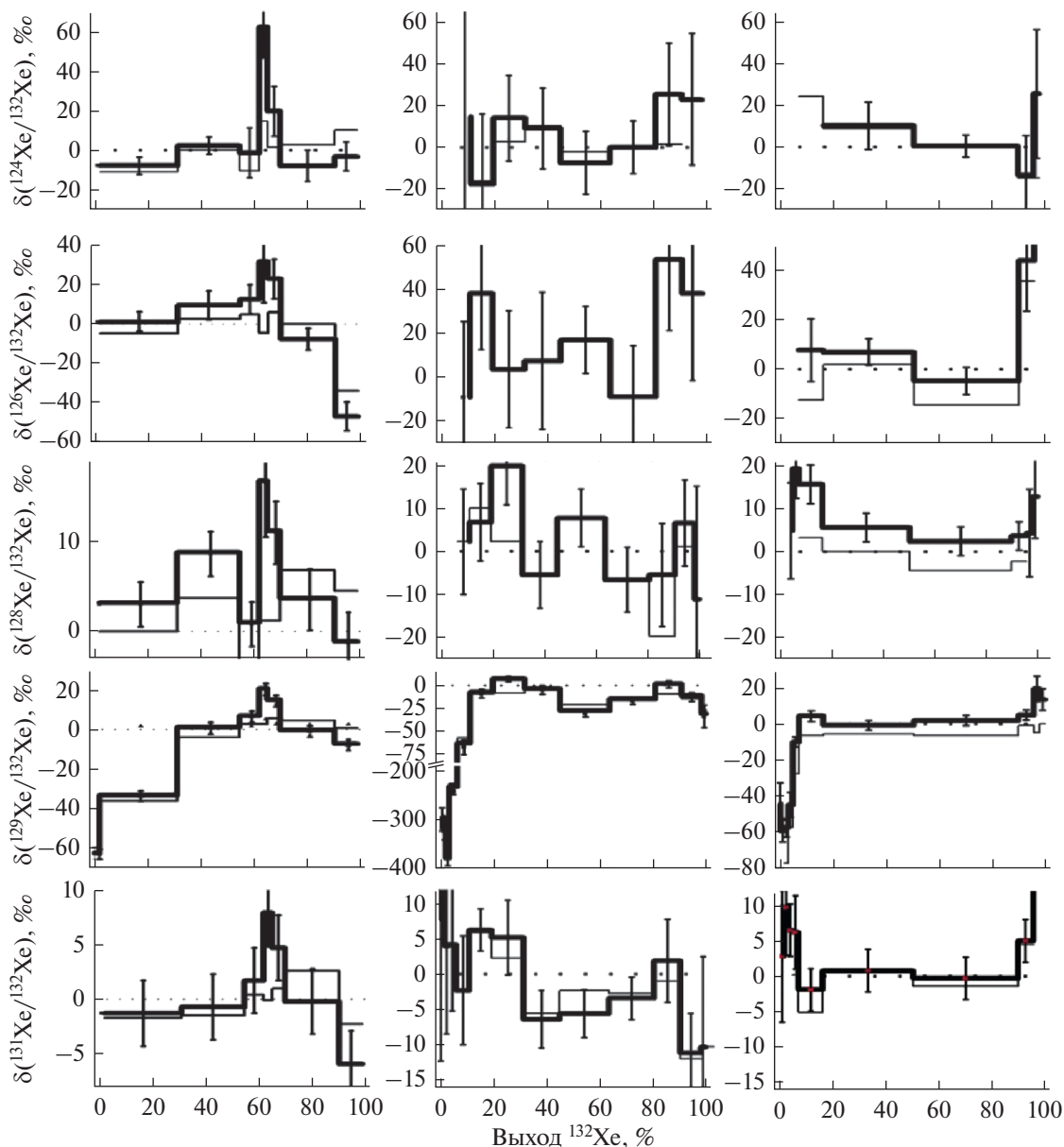


Рис. 4. Отклонения вычисленных изотопных отношений ксенона от измеренных при выделении ^{132}Xe из наноалмазов Orgueil, Tieschitz и Indarch (левая, средняя и правая колонки, соответственно) по данным этой работы (жирные линии) и Huss, Lewis (1994a) (тонкие линии). Погрешности ($\pm\sigma$) обусловлены ошибками измерений.

Полученные нами и в статье (Huss, Lewis, 1994b) данные о содержаниях и кинетике выделения компонентов ксенона в наноалмазе метеоритов при использовании изотопных составов Xe-рг и Xe-НЛ, соответственно, наиболее вероятно показывают предельные их значения. Косвенным критерием выбора реальных свойств компонентов ксенона в настоящее время могут быть результаты анализов изотопного состава углерода во фракциях зерен наноалмаза метеорита Allende (Lewis и др., 2019). Согласно этим результатам доля зерен наноалмаза, обогащенных изотопом ^{13}C и

образованных, вероятно, при взрыве сверхновой II типа, от всего наноалмаза в этом метеорите должна быть менее 1%. Поэтому реальные свойства компонентов Xe в наноалмазе метеоритов наиболее вероятно подобны полученным при использовании в расчетах Xe-рг из-за существенно меньшего его относительного содержания по сравнению с компонентом Xe-НЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Clayton D.D. Of origin of heavy xenon in meteoritic diamonds // *Astrophys. J.* 1989. V. 340. P. 613–619.

- Fisenko A.V., Semjonova L.F.* About $^{129}\text{Xe}^*$ in meteoritic nanodiamonds // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2008. V. 72. P. 4177–4183.
- Gilmour J.D., Holland G., Verchovsky A.B., Fisenko A.V., Crowther S.A., Turner G.* Xenon and iodine reveal multiple distinct exotic xenon components in Efremovka “nanodiamonds” // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2016. V. 177. P. 78–93.
- Heymann D., Dziczkaniec M.* Xenon from intermediate zones of supernovae // *Proc. 10th Lunar and Planet. Sci. Conf. Houston.* 1979. P. 1943–1959.
- Howard W.M., Meyer B.S., Clayton D.D.* Heavy-element abundances from a neutron burst that produces Xe-H // *Meteoritics.* 1992. V. 27. P. 404–412.
- Huss G.R., Lewis R.S.* Noble gases in presolar diamonds I: Three distinct component and their implication for diamond origins // *Meteoritics.* 1994a. V. 29. P. 791–810.
- Huss G.R., Lewis R.S.* Noble gases in presolar diamonds II: Component abundances reflect thermal processing // *Meteoritics.* 1994b. V. 29. P. 811–829.
- Huss G.R., Ott U., Koscheev A.P.* Noble gases in presolar diamonds III: implantation experiments with synthetic nanodiamonds // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2008. V. 43. P. 1811–1826.
- Lewis R.S., Amari S.A., Anders E.* Interstellar grains in meteorites. II. SiC and its noble gases // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1994. V. 58. P. 471–494.
- Lewis J.B., Floss C., Isheim D., Daulton T.L., Seidman D.N., Ogliore R.* Origins of meteoritic nanodiamonds investigated by coordinated atom-prob tomography and transmission electron microscopy studies // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2019. P. 1–22.
- Ott U.* Interstellar diamond xenon and time scales of supernova ejecta // *Astrophys. J.* 1996. V. 463. P. 344–348.
- Rayet M., Arnold M., Hashimoto M., Prantzos N., Nomoto K.* The p-process in type II supernovae // *Astron. and Astrophys.* 1995. V. 298. P. 517–527.
- Thielemann F.K., Eichler M., Panov I.V., Wehmeyer B.* Neutron star mergers and nucleosynthesis of heavy elements // *Science.* 2017. V. 67. P. 253–274.