

УДК 550.42

## ПОТЕНЦИАЛЬНО ПЕРВИЧНЫЕ КОМПОНЕНТЫ КСЕНОНА В ОБОГАЩЕННЫХ НАНОАЛМАЗОМ ФРАКЦИЯХ МЕТЕОРИТОВ: НОВЫЕ ИЗОТОПНЫЕ СОСТАВЫ И ФАЗЫ НОСИТЕЛИ

© 2024 г. А. В. Фисенко\*, Л. Ф. Семенова, Т. А. Павлова\*\*

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

*\* e-mail: anat@chgnnet.ru*

*\*\* pavlova4tat@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.10.2023 г.

После доработки 23.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Потенциально первичный компонентный состав ксенона в обогащенных наноалмазом фракциях (ОНФ) метеоритов определен в предположении, что в нем имеются два почти нормальных, но разных по изотопному составу компонента (Xe-P3 и Xe-P3n). Компонент Xe-P3n содержится в индивидуальной популяции зерен алмаза, тогда как компонент Xe-P3 – в алмазоподобных каемках на зернах алмаза. Наличие компонента Xe-P3n сделало возможным использование радиоактивных продуктов классического r-процесса нуклеосинтеза при взрыве сверхновой II типа для образования по гипотезе Ott (1996) двух компонентов ксенона с аномальным изотопным составом (Xe-pr1n и Xe-pr2n) без повышенного содержания изотопа  $^{132}\text{Xe}$  относительно содержания изотопа  $^{136}\text{Xe}$ . Предполагается, что имплантация (сорбция) изотопов компонентов Xe-pr1n и Xe-pr2n в их фазы носители произошла, вероятно, в разных по составу турбулентных зонах смешения внешних и внутренних оболочек сверхновой II типа после ее взрыва. Компонент Xe-pr1n содержится в индивидуальной популяции зерен наноалмаза, тогда как фазой носителем Xe-pr2n впервые предполагаются зерна SiC-X, эволюция которых связана со сверхновой II типа. Поэтому при разрушении зерен SiC-X, например, в лабораторных условиях выделяется смесь из компонентов Xe-S и Xe-pr2n, обозначенная нами как Xe-X. Таким образом, согласно предложенной нами концепции, первичный компонентный состав ксенона состоит, кроме Xe-S, из Xe-P3, Xe-P3n, Xe-pr1n и Xe-X, содержащихся в разных индивидуальных фазах носителях. Проведенные успешные вычисления содержаний этих компонентов в ОНФ таких разных метеоритов, как Murchison CM2 и Allende CV3, и их анализ показали, что указанные выше компоненты могут быть реальными компонентами.

**Ключевые слова:** наноалмаз метеоритов, первичные компоненты ксенона, новые изотопные составы, зерна SiC-X

**DOI:** 10.31857/S0320930X24020082, **EDN:** NTYNGC

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования благородных газов в обогащенных наноалмазом фракциях (ОНФ) метеоритов – перспективное направление исследования реликтов (досолнечных) зерен протопланетного облака в метеоритном веществе. Использование этих фракций в данном случае обусловлено тем, что содержащийся в них каждый из благородных газов (в частности, ксенон) – это смеси различных по изотопному составу его компонентов, образованных в разных процессах нуклеосинтеза (Huss, Lewis, 1994a). Ранее было показано, что изотопный состав ксенона в ОНФ может быть представлен как смесь его компонентов, обозначенных как Xe-P3, Xe-P6 или Xe-P6e, Xe-НL и Xe-S (Huss, Lewis, 1994b). На основании иден-

тифицированных компонентов ксенона в работе (Huss, Lewis, 1994a) было предположено следующее. Компоненты Xe-P3 и Xe-P6 по изотопному составу подобны солнечному составу, но существенно отличаются между собой по температуре выделения: Xe-P3 выделяется в основном при низкой температуре пиролиза ( $<800^\circ\text{C}$ ), тогда как Xe-P6 – при более высокой ( $>1100^\circ\text{C}$ ). Изотопные составы Xe-НL и Xe-P6e уникальны – каждый из них одновременно обогащен как легкими, так и тяжелыми изотопами ксенона. Оба эти компонента выделяются в основном при высоких температурах ( $>1100^\circ\text{C}$ ), причем Xe-P6e более высокотемпературный. Кинетика выделения компонента Xe-S при пиролизе подобна таковой для Xe-P6e. Из приведенных компонентов только

Хе-S можно отнести к первичному (исходному) компоненту ксенона. Здесь и далее к первичным компонентам ксенона мы относим компоненты ксенона, состоящие из изотопов, образованных в одном из процессов нуклеосинтеза или из нескольких разных процессов нуклеосинтеза, которые не могут быть разделены между собой. В случае компонента Хе-S — это медленный процесс захвата нейтронов (s-процесс), например, на стадии эволюции звезд AGB (асимптотическая ветвь гигантов) и его фазой носителем являются зерна SiC (Lewis и др., 1994), а также зерна нанодиама, генезис которых связан с этими звездами (Verchovsky и др., 2006). Для компонента Хе-P3 астрофизическим источником предполагается молекулярное облако, являющееся результатом смещения, в частности, изотопов ксенона, образованных в различных процессах нуклеосинтеза. Поэтому компонент Хе-P3 также можно отнести, в некоторой степени, к первичному компоненту ксенона. Его фазой носителем принимаются зерна нанодиама и/или алмазоподобные каемки на этих зернах. Возможность образования этих фаз из органического вещества в молекулярном облаке под действием ультрафиолетового облучения была показана, например, в работе (Kouchi, Nakano, 2005). Относительно низкотемпературное выделение Хе-P3 при ступенчатом пиролизе ОНФ метеоритов обусловлено либо диффузией, в предположении, что ксенон находится в ловушках кристаллической решетки алмазов с низкой энергией активации (Koscheev и др., 2001), либо диффузией (и/или деструкцией) из алмазоподобной каемки (Huss, Lewis, 1994a; Fisenko и др., 2014). Высокотемпературный пик выделения Хе-P3 обусловлен графитизацией зерен нанодиама. Образование изотопного состава компонента Хе-P6 в настоящее время неясно.

Компоненты Хе-NL и Хе-P6e имеют аномальный изотопный состав из-за резкого обогащения легкими ( $^{124,126}\text{Xe}$ ) и тяжелыми ( $^{134,136}\text{Xe}$ ) изотопами по сравнению с солнечным составом. Одновременное обогащение ксенона этими изотопами обусловлено дополнительным содержанием этих изотопов, образованных, наиболее вероятно, при взрыве сверхновой II типа в r-процессе (фоторасщепление) и в классическом или в “мини” g-процессе (быстрый захват нейтронов) (Heumann, Dziczkaniec, 1979; Clayton, 1989; Howard и др., 1992). При классическом g-процессе нуклеосинтеза образование тяжелых изотопов компонента Хе-NL (т. е. “ветвь” Хе-N) происходило в результате кратковременного (около 2 часов) захвата продуктов радиоактивного распада их предшественников с момента взрыва сверхновой II типа (Ott, 1996). Промежуточные по массе изотопы ксенона компонента Хе-NL с массой 128–132,

кроме  $^{130}\text{Xe}$ , образованы в s- и g-процессах нуклеосинтеза. Изотоп  $^{130}\text{Xe}$  образуется только в s-процессе нуклеосинтеза, так как его образование в g-процессе блокируется стабильным изотопом  $^{130}\text{Te}$ . Таким образом, Хе-NL и Хе-P6e — это смесь изотопов ксенона, образованных в разных процессах нуклеосинтеза и, возможно, в разных астрофизических источниках.

В настоящее время общепринято считать, что компоненты ксенона с аномальным изотопным составом — это смесь двух субкомпонентов: почти “нормального” по изотопному составу ксенона и образованного в r- и g-процессах нуклеосинтеза аномального ксенона (см., например, Ott, 1996; Gilmore и др., 2005). Последний, субкомпонент с аномальным изотопным составом, мы относим к первичному компоненту ксенона, так как в настоящее время отделить r- и g-изотопы друг от друга не представляется возможным. Изотопный состав этого первичного компонента можно определить, вычитая из состава компонента Хе-NL, а также, вероятно, Хе-P6e, их “нормальную” составляющую изотопного состава, нормируя ее к содержанию всего  $^{130}\text{Xe}$ . Поэтому изотопный состав этого первичного компонента существенно зависит от состава нормального компонента. В частности, использование почти нормального компонента Хе-P3 и предположение, что каждый из субкомпонентов Хе-NL содержится в индивидуальных популяциях зерен нанодиама, позволило определить содержание первичных компонентов ксенона с аномальным изотопным составом в метеоритах Tieschitz H3.6, Orgueil C1 и Indarch EN3–4 (Фисенко, Семенова, 2020). При этом основным компонентом ксенона в этих метеоритах, независимо от их петрологического типа, является компонент Хе-P3, и его термостабильность находится в широком интервале температур, в том числе его высокотемпературная часть выделения сопоставима с таковой для субкомпонента с аномальным изотопным составом ксенона.

Использование индивидуальных субкомпонентов как для Хе-NL, так и Хе-P6e при вычислениях компонентного состава ксенона показало, что ксенон в ОНФ метеоритов в основном может состоять из почти нормального компонента Хе-P3, а также из компонентов с аномальным изотопным составом Хе-pr1 и Хе-pr2, являющихся аномальными субкомпонентами в Хе-NL и в Хе-P6e соответственно. Два последних компонента могли быть образованы в r- и g-процессах нуклеосинтеза при взрыве одной из сверхновых II типа, но имплантированы/захвачены в зерна алмаза в разные промежутки времени (Фисенко, Семенова, 2022).

Использование компонента Хе-P3 для вычисления по гипотезе Ott первичных компонентов

ксенона с аномальным изотопным составом приводит к повышению величины отношения в них  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  относительно величины, соответствующей продолжительности захвата тяжелых изотопов ксенона – 0.07 против 0.01 (Ott, 1996). Это различие, по предположению Ott, обусловлено добавлением к компоненту Хе-НЛ некоторого содержания изотопов ксенона, образованных в результате полного распада их радиоактивных предшественников. Однако на какой стадии образования, в частности, компонента Хе-НЛ происходит это добавление – неизвестно. Уменьшение величины отношения  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  от 0.07 до 0.04 было получено в предположении масс фракционирования Хе-РЗ при имплантации в нанозерна алмаза. Это предположение сделано на основании результатов модельных экспериментов по имплантации благородных газов в синтетические наноалмазы (Huss и др., 2008). Вместе с тем более существенное соответствие между кратковременной имплантацией и величиной отношения  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  может быть, как впервые нами показано, достигнуто в результате корректирования изотопного состава компонента Хе-РЗ (Fisenko и др., 2023). Такое корректирование возможно, поскольку вопрос о соответствии изотопного состава нормального субкомпонента Хе-РЗ компонентам с аномальным изотопным составом ксенона является открытым в настоящее время.

В данной работе на основании использования скорректированного почти нормального по изотопному составу компонента (обозначен как Хе-РЗn), позволившего получить соответствие между избыточными содержаниями  $^{132}\text{Xe}$  и  $^{136}\text{Xe}$ , выполнено следующее: 1) определение новых аномальных изотопных составов компонентов ксенона, обозначенных как Хе-рr1n и Хе-рr2n, соответствующих субкомпонентам с аномальным изотопным составом в компонентах Хе-НЛ и Хе-Р6е; 2) решение вопроса об образованных при эволюции сверхновой II типа зерен SiC-X как фазы носителя компонента с аномальным изотопным

составом Хе-рr2n; 3) вычисления и анализ содержаний предполагаемых первичных компонентов Хе-РЗ, Хе-РЗn, Хе-рr1n и Хе-рr2n, а также ХеS в ОНФ таких разных по химическому классу и петрологическому типу метеоритов, как Murchison CM2 и Allende CV3. Некоторые полученные предварительные результаты этой работы приведены в (Fisenko и др., 2023; Fisenko, Semjonova, 2022; Fisenko и др., 2023).

### КОРРЕКТИРОВАНИЕ И ВЫЧИСЛЕНИЯ ИЗОТОПНЫХ СОСТАВОВ КОМПОНЕНТОВ КСЕНОНА

В рамках гипотезы Ott величина отношения  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  для субкомпонента с аномальным изотопным составом в Хе-НЛ равна 0.011 (Ott, 1996). Для получения этой величины содержание Хе-S в компоненте Хе-РЗ нами уменьшено на 3.6% (относительно  $^{130}\text{Xe}$ ). Вычисленные после этого изотопные составы почти нормального компонента и аномального субкомпонента, обозначенные как Хе-РЗn и Хе-рr1n, приведены в табл. 1.

В составе компонента Хе-рr1n величина отношения  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  равна 0.013 и она почти соответствует продолжительности (2.12 ч) распада радиоактивных предшественников ксенона, вычисленной на основании отношения  $^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ . Компоненты ксенона Хе-РЗn и Хе-рr1n мы относим к первичным компонентам, и каждый из них содержится в индивидуальных популяциях зерен наноалмаза. Подчеркнем, что, в отличие от Хе-РЗn, содержащегося в зернах наноалмаза, компонент Хе-РЗ, идентифицированный в (Huss, Lewis, 1994a), содержится в алмазоподобной фазе носителя либо в виде индивидуальных зерен, либо в поверхностных каемках зерен наноалмаза. Термостабильность компонента Хе-РЗ ниже, чем у Хе-РЗn. Таким образом, в нашей концепции почти нормальный по изотопному составу компонент Хе-РЗ – это смесь Хе-РЗn с некоторой долей Хе-S. Для этой смеси величина отношения Хе-S/Хе-РЗn равна 0.012.

**Таблица 1.** Изотопные составы потенциально первичных компонентов ксенона ( $^{132}\text{Xe} = 100$ ) в обогащенных наноалмазом фракциях метеоритов

Компонент	$^{124}\text{Xe}$	$^{126}\text{Xe}$	$^{128}\text{Xe}$	$^{129}\text{Xe}$	$^{130}\text{Xe}$	$^{131}\text{Xe}$	$^{134}\text{Xe}$	$^{136}\text{Xe}$
Хе-РЗ	0.451	0.404	8.06	104.2	15.91	82.32	37.70	31.00
Хе-РЗn	0.456	0.409	7.896	105.3	15.518	83.09	38.13	31.37
Хе-S	0	0.033	21.59	11.08	48.26	18.6	2.22	0.34
Хе-рr1n	76.93	32.24	236.75	161.06	≡0	346.56	5092	7693
Хе-рr2n	77.01	38.40	305.28	1297	≡0	499.22	4614	7812
Хе-X	14.95	7.48	76.65	261.26	38.89	111.90	897.36	1516.52

Далее мы предполагаем, что в компоненте Хе-Р6е: 1) субкомпонентом с нормальным изотопным составом является компонент Хе-Р3п; 2) субкомпонент с аномальным изотопным составом, обозначенный далее как Хе-р2п, по своему генезису подобен таковому Хе-р1п. Как следует из этих предположений, компонент Хе-Р6е должен содержать также компонент Хе-С. Это обусловлено высокой величиной отношения  $^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$  в компоненте Хе-Р6е относительно Хе-Р3п (0.1589(3) против 0.1552(3)) соответственно. Поэтому компонентный состав Хе-Р6е представляет собой смесь субкомпонентов Хе-Р3п, Хе-р2п и Хе-С в соотношении ( $^{132}\text{Xe} \equiv 100$ ): 98.41(9), 0.309(1), 1.282(88) соответственно. Здесь и далее в скобках — числа, соответствующие конечным числам в значении погрешности вычислений, т. е., например, 1.282(88) это  $1.282 \pm 0.088$ . Вычисленный изотопный состав субкомпонента Хе-р2п в Хе-Р6е при величине отношения  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ , равного 0.012, приведен в табл. 1. Здесь также приведен общепринятый изотопный состав Хе-С по данным в (Lewis и др., 1994).

На основании приведенного компонентного состава Хе-Р6е мы предполагаем, что на трех графиках изотопов ксенона, одним из конечных членов линейной зависимости, содержащим компонент Хе-Р6е, является компонент Хе-Р3п, так же как для компонента Хе-НЛ. В этом случае другим конечным членом этой зависимости должна быть смесь Хе-р2п с Хе-С. Эта смесь компонентов далее принимается нами как индивидуальный компонент, и он обозначен как Хе-Х. Его изотопный состав приведен также в табл. 1. Исходя из компонентного состава Хе-Р6е, величину соотношения субкомпонентов Хе-р2п/Хе-С в компоненте Хе-Х можно оценить как 0.241(17). Наиболее вероятным процессом образования компонента Хе-Х является имплантация (или сорбция) Хе-р2п в зерна SiC и/или в образованные в AGB-звездах зерна nanoалмаза, резко обогащенные Хе-С (Verchovsky и др., 2006). В этом случае генезис и/или эволюция этих зерен обоих типов должны быть связаны со сверхновой II типа, поскольку, как отмечено выше, Хе-р2п с аномальным изотопным составом образуется из радиоактивных продуктов классического г-процесса при взрыве этой сверхновой. Далее мы выбираем зерна SiC как фазу носитель компонента Хе-Х. Это связано с тем, что такие зерна, обозначенные как зерна SiC-Х, были идентифицированы ранее по изотопным признакам, например, углерода и азота, а также по содержаниям радиогенного  $^{44}\text{Ca}$  в индивидуальных микронных зернах SiC кислотно нерастворимого остатка метеорита Murchison CM2 (Nittler, Hoppe, 2005). Для последующего обсуждения необходимо подчеркнуть, что каждое

из идентифицированных зерен SiC-Х в этой работе содержит в основном только некоторые из этих признаков. Эта особенность свидетельствует о том, что эволюция зерен SiC-Х происходила в разных областях сверхновой после ее взрыва. Предположение о возможном содержании благородных газов в зернах SiC-Х, по крайней мере компонентов с аномальным изотопным составом ксенона, было сделано на основании анализа его компонентного состава в ОНФ некоторых метеоритов (Фисенко, Семенова, 2022; Fisenko и др., 2023).

Из данных в табл. 1 следует, что величины отношений  $^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  для компонентов Хе-р1п и Хе-р2п равны 0.662 и 0.591 соответственно. Согласно гипотезе Ott, эти значения отношений указывают на продолжительность захвата изотопов ксенона фазами носителями с момента взрыва сверхновой в течение 2.12 и 1.89 ч соответственно. За эти временные интервалы происходит почти полный распад радиоактивных предшественников изотопа  $^{124}\text{Xe}$ , образованных в р-процессе нуклеосинтеза при взрыве сверхновой II типа. Поэтому почти равные отношения  $^{124}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  для компонентов Хе-р1п и Хе-р2п (0.0100 и 0.00985 соответственно) могут свидетельствовать об одном астрофизическом источнике образования этих компонентов, например, сверхновой II типа. Вместе с тем для Хе-р2п со временем захвата изотопов ксенона, более коротким по сравнению с Хе-р1п, отношения содержаний изотопов  $^{126, 128, 129, 131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ , образованных в основном в s- и г-процессах нуклеосинтеза, более высокие, чем для компонента Хе-р1п. Это различие отражает, наиболее вероятно, как отмечалось выше, разные фазы носители этих компонентов, а именно: для Хе-р1п — это зерна nanoалмаза, тогда как для Хе-р2п — зерна SiC-Х. Поэтому повышенные отношения содержаний изотопов ксенона в компоненте Хе-р2п могли быть результатом неопределенности изотопного состава Хе-С в зернах SiC-Х. Кроме этого, из-за возможно больших размеров зерен SiC-Х, чем зерна nanoалмаза, увеличивается доля захваченных радиоактивных предшественников изотопов ксенона в зернах SiC-Х. Последний фактор обусловил наиболее резкое увеличение отношения  $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$  в компоненте Хе-р2п по сравнению с Хе-р1п за счет более эффективного захвата  $^{129}\text{I}$  в результате возможного взаимодействия атомов йода с кремнием. Захват ксенона компонента Хе-р1п и Хе-р2п зернами алмаза и SiC-Х, соответственно, произошел, как мы предполагаем, в разных по химическим составам турбулентных зонах смешения фрагментов внешних и внутренних слоев одной из сверхновых II типа при ее взрыве. В этом случае вычисленные нами выше продолжительности образо-

вания компонентов Хе-р1n и Хе-р2n (т. е. 2.12 ч и 1.89 ч соответственно) являются следствием продолжительности существования, т. е. продолжительности экранирования от внешней среды этих турбулентных зон. Естественно предположить, что каждый из компонентов Хе-р1n и Хе-р2n представляет собой средний состав многих турбулентных зон с близкими (подобными) их свойствами.

На основании вышеприведенного, мы принимаем, что компонент Хе-р2n представляет собой средний состав одной из групп и содержится в основном в индивидуальной популяции зерен SiC-X, тогда как компонент Хе-р1n – это средний состав другой группы зон и содержится в основном в индивидуальной популяции зерен наноалмаза. Различие этих компонентов по изотопному составу свидетельствует о различии свойств между группами этих зон. В первом приближении это различие отмечалось выше для зерен SiC-X по данным (Nittler, Noppe, 2005). Вопрос о происхождении при взрыве сверхновой зон, различающихся по степени обогащения нанозернами алмаза и SiC-X, является открытым на данной стадии исследования. Возможно, что одним из основных факторов, способствующих такому различию турбулентных зон, является различие температур газопылевой среды этих зон. В этом случае температура групп турбулентных зон, в которых происходит образование компонента Хе-р2n, должна быть более высокой, чем таковая в группе зон с образованием Хе-р1n, и тем самым в ней в большей степени сохранены зерна SiC-X, чем зерна наноалмаза.

Таким образом, согласно нашей концепции, следует, что компонентный состав ксенона в ОНФ метеоритов состоит из таких потенциально первичных компонентов: два компонента с почти нормальным изотопным составом Хе-Р3 и Хе-Р3n и два компонента с аномальным изотопным составом Хе-р1n и Хе-Х, и Хе-S. Каждый из этих компонентов, кроме Хе-Р3, содержится в индивидуальной популяции зерен их фаз носителей. Для компонентов ксенона Хе-Р3n и Хе-р1n этими фазами являются зерна наноалмаза. Компонент ксенона Хе-Р3 содержится, наиболее вероятно, в алмазоподобной фазе в виде индивидуальных зерен и/или в поверхностных каемках зерен наноалмаза. Фазой носителем компонента Хе-Х являются зерна SiC-X, образованные на стадии красного гиганта предсверхновой II типа, тогда как носители компонента Хе-S – это зерна SiC, образованные, например, при эволюции AGB-звезд.

Ниже приведены полученные нами результаты анализа вычисленных содержаний предполагаемых первичных компонентов ксенона в ОНФ

таких разных метеоритов, как Murchison и Allende, относящихся к разным химическим классам и испытавших в разной степени термальный метаморфизм.

### ВЫЧИСЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЙ КОМПОНЕНТОВ КСЕНОНА В ОНФ МЕТЕОРИТОВ

Принимая во внимание, что субкомпонентами в Хе-Р3 являются компоненты Хе-Р3n и Хе-S, тогда как в Хе-Х-Хе-р2n и Хе-S, для детального анализа соотношений компонентов ксенона мы вычислили их содержания в ОНФ метеоритов Murchison и Allende для таких компонентов, как Хе-Р3n, Хе-р1n, Хе-р2n и Хе-S. При таком подходе индикаторами наличия компонентов Хе-Р3 и Хе-Х в выделенном ксеноне являются значения вычисленных отношений Хе-S/Хе-Р3n и Хе-р2n/Хе-S соответственно. Как следует из вышеизложенного, значения этих отношений должны быть равными 0.012 и 0.241 соответственно. Вычисление указанных выше компонентов ОНФ метеоритов проведено с использованием следующих уравнений.

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

$$\begin{aligned} \left( {}^{130}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_{\text{P3n}} \times X + \left( {}^{130}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_S \times V = \\ = \left( {}^{130}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_m \times \left[ {}^{132}\text{Xe} \right]_m; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \left( {}^{134}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_{\text{P3n}} \times X + \left( {}^{134}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_{\text{pr2n}} \times Z + \\ + \left( {}^{134}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_{\text{pr1n}} \times Y + \left( {}^{134}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_S \times V = \\ = \left( {}^{134}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_m \times \left[ {}^{132}\text{Xe} \right]_m; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \left( {}^{136}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_{\text{P3n}} \times X + \left( {}^{136}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_{\text{pr2n}} \times Z + \\ + \left( {}^{136}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_{\text{pr1n}} \times Y + \left( {}^{136}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_S \times V = \\ = \left( {}^{136}\text{Xe}/{}^{132}\text{Xe} \right)_m \times \left[ {}^{132}\text{Xe} \right]_m, \end{aligned} \quad (4)$$

где переменные X, Z, Y, V – это содержания  ${}^{132}\text{Xe}$  компонентов Хе-Р3n, Хе-р2n, Хе-р1n и Хе-S соответственно.

Индексы Р3n, р2n, S и р1n относятся к изотопным составам компонентов ксенона (табл. 1), а индекс m – к измеренным содержаниям  ${}^{132}\text{Xe}$  и изотопным отношениям ксенона при пиролизе ОНФ метеоритов. При вычислениях содержаний компонентов ксенона нами использовались изотопные составы этих компонентов без их погрешностей (табл. 1). Это связано с тем, что эти

составы должны быть постоянными независимо от температуры и процесса их выделения из ОНФ метеоритов. Вместе с тем измеренные изотопные отношения ксенона, использованные для нормирования вышеприведенных уравнений (1)–(4), привлекались с их погрешностями. Возможность применения предлагаемых новых первичных компонентов ксенона для вычислений и анализа содержаний этих компонентов в ОНФ метеоритов нами показана по данным для ксенона в ОНФ Murchison CM2 и Allende CV3. Выбор этих метеоритов обусловлен следующим.

1. Родительские тела этих метеоритов претерпели существенно различный термальный метаморфизм — если Murchison претерпел нагрев не более 100°C, то Allende — около 600°C, причем в окислительных условиях (Huss, Lewis, 1994b). При успешном моделировании измеренных изотопных составов ксенона в ОНФ этих метеоритов с использованием предлагаемых компонентов ксенона эти компоненты с большой вероятностью можно отнести к реальным компонентам.

2. Содержания и изотопные составы ксенона, выделенного при ступенчатом пиролизе ОНФ этих метеоритов, приведенные в (Lewis, Anders, 1988; Lewis, 1994) были измерены с высокой точностью, что делает более достоверными сделанные нами ниже выводы. Детальный анализ содержаний изотопов первичных компонентов ксенона, не использованных в выражениях (1)–(4), в частности,  $^{129}\text{Xe}$  в ОНФ Murchison и Allende, а также результаты анализа компонентного состава ксенона в ОНФ метеоритов, относящихся к различным химическим классам и петрологическим типам, будут показаны в предполагаемой нами новой статье.

Отметим, что выделение ОНФ метеоритов Murchison CM2 и Allende CV3 было основано на сепарации коллоидноподобных растворов кислотно-нерастворимых остатков при различных рН. В результате этой сепарации были получены семь фракций метеорита Murchison CM2. Однако в работе (Lewis, 1994) приведены данные только для четырех фракций, обозначенных как LDA (рН < 2), LD3 (рН = 5.4–5.6), LD4 (рН = 5.6–6.7) и LD7 (рН > 7). В сумме эти фракции содержат 70% от общего содержания ОНФ этого метеорита. ОНФ метеорита Allende был разделен на три фракции, обозначенные как DN (рН < 3), DM (рН = 3.0–3.7) и DK (рН > 3.7). Увеличение рН раствора при сепарации приводит к выделению фракций зерен с большими размерами и/или с меньшей дефектностью их поверхностных слоев. Поэтому фракции LDA и DN, наиболее вероятно, обогащены зернами меньших размеров и большей дефектностью, чем зерна фракций LD7 и DK. Выделение ксенона из фракций было

проведено в различных температурных интервалах. Поэтому для сравнения кинетики выделения компонентов ксенона между фракциями Murchison и Allende данные для некоторых температурных интервалов были нами суммированы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вычисленных содержаний компонентов  $\text{Xe-P3n}$ ,  $\text{Xe-pr1n}$ ,  $\text{Xe-pr2n}$ , а также  $\text{Xe-S}$ , выделенных при ступенчатом пиролизе фракций Murchison CM2, приведены в табл. 2.

Здесь приведены также отношения содержаний некоторых компонентов. Анализ этих данных показал следующее.

1. Выделенный при пиролизе до 1200°C ксенона из всех фракций имеет почти нормальный изотопный состав, что можно видеть, например, по величине отношения содержаний  $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ , и этот состав в последующем мы относим к низкотемпературному компоненту ксенона. Величина отношения  $\text{Xe-S}/\text{Xe-P3n}$  для этого компонента ксенона на всех температурных ступенях его выделения, как показано, например, для LDA фракции (табл. 2), постоянна в пределах (1–2) с погрешностей их вычислений. Очевидно, что эта особенность обусловлена проведенным выше корректированием  $\text{Xe-P3}$ . Поэтому в нашей концепции в ОНФ слабо термально метаморфизованных метеоритов имеются два разных компонента ксенона с почти нормальным изотопным составом. Один из них,  $\text{Xe-P3n}$ , содержится в индивидуальной популяции зерен алмаза. Другой компонент образован как единая газовая смесь в результате смешения  $\text{Xe-P3n}$  с дополнительной порцией  $\text{Xe-S}$ . Именно этот компонент, идентифицированный как компонент  $\text{Xe-P3}$  в работе (Huss, Lewis, 1994a), содержится в алмазоподобной фазе с более низкой термостабильностью, чем зерна алмаза. Эта фаза может находиться в виде популяций индивидуальных зерен либо в виде поверхностных каемок на зернах наноалмаза. Из последнего следует, что  $\text{Xe-P3}$  с его фазой носителем был образован после образования зерен наноалмаза с  $\text{Xe-P3n}$ . Газовая смесь  $\text{Xe-P3n}$  с дополнительной порцией  $\text{Xe-S}$ , вероятно, могла быть образована на ранних стадиях эволюции протосолнечного облака в результате частичного разрушения фаз носителей этих компонентов ксенона под действием, например, ударных волн. Этот процесс протекал, вероятно, в период образования хондр и CAI-включений. Существенным фактором образования  $\text{Xe-P3}$  с повышенным содержанием  $\text{Xe-S}$  могло быть увеличение относительного содержания  $\text{Xe-S}$  в протосолнечной туманности, которое предполагается в работе (Gilmour и др., 2016), если это увеличение прои-

**Таблица 2.** Содержания  $^{132}\text{Xe}$  (в  $10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г) и компонентов ксенона (в  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>/г) в обогащенных нанодiamond фракциях метеорита Murchison CM2

T/100, °C	$^{132}\text{Xe}^a$	$^{136}\text{Xe}/$ $^{132}\text{Xe}^a$	P3n	pr1n	pr2n	Xe-S	pr2n/ pr1n	pr2n/ XeS	XeS/ P3n
<b>Фракция LDA (7.75%)</b>									
6	2.9554	0.3219 (6)	291.0 (2)	0.00 (3)	0.05 (3)	4.49 (16)	HO <sup>b</sup>	0.0111 (72)	0.0154 (5)
8	18.1834	0.3201 (3)	1794.79 (47)	0.00 (12)	0.43 (13)	23.31 (31)	HO	0.0184 (57)	0.0130 (2)
10	5.9134	0.3323 (4)	583.98 (29)	0.034 (46)	0.136 (51)	7.19 (21)	HO	0.0189 (71)	0.0123 (4)
12	1.3348	0.4215 (13)	131.02 (13)	0.197 (28)	HO	2.26 (85)	HO	HO	0.0173 (7)
6÷12°	28.367	0.3276 (2)	2798.81 (61)	0.04 (14)	0.62 (15)	37.23 (41)	HO	0.0166 (40)	0.0133 (2)
18	15.0959	0.6115 (4)	1494.69 (40)	4.46 (11)	1.42 (12)	9.02 (26)	0.318 (28)	0.157 (14)	0.0060 (2)
22	2.1423	0.6011 (3)	206.64 (20)	0.247 (37)	0.378 (45)	6.96 (14)	1.53 (29)	0.0543 (64)	0.0337 (7)
6÷22°	45.6052	0.4310 (3)	4500.2 (1.2)	4.75 (30)	2.41 (33)	53.19 (77)	0.507 (77)	0.0453 (63)	0.0118 (2)
<b>Фракции LD3+LD4 (47.71%)</b>									
6÷12	32.9497	0.328317 (2)	3254.9 (6)	0.28 (11)	0.50 (12)	39.31 (46)	1.79 (82)	0.0127 (30)	0.0121 (1)
18	8.5848	0.6218 (3)	858.2 (2)	3.10 (5)	0.36 (6)	2.9 (2)	0.116 (19)	0.124 (21)	0.0034 (2)
22	11.14205	0.5948 (6)	1104.4 (4)	2.56 (8)	1.52 (9)	5.75 (26)	0.594 (42)	0.264 (20)	0.0052 (2)
6÷22	52.6766	0.4325 (2)	5211.7 (8)	5.91 (15)	2.41 (16)	47.7 (6)	0.408 (29)	0.0505 (34)	0.0092 (1)
<b>Фракция LD7 (15.24%)</b>									
6÷12	43.7316	0.3278 (2)	4319.9 (8)	0.33 (16)	0.56 (17)	52.3 (5)	1.70 (97)	0.0108 (33)	0.0121 (1)
18	21.219	0.5995 (5)	2101.74 (56)	5.64 (15)	2.29 (17)	12.23 (36)	0.406 (31)	0.187 (15)	0.0058 (2)
22	2.6834	0.5414 (10)	261.06 (25)	0.367 (46)	0.449 (51)	6.47 (18)	1.22 (21)	0.0694 (81)	0.0248 (7)
6÷22°	67.6340	0.4204 (2)	6683.32 (96)	6.19 (22)	3.46 (24)	70.43 (64)	0.559 (44)	0.0491 (35)	0.0105 (1)
<b>Средневзвешенный состав (70% ОНФ)</b>									
	38.9738	0.4292 (11)	3853.81 (40)	4.13 (8)	1.86 (9)	37.61 (31)	0.450 (23)	0.0495 (23)	0.0098 (1)

**Примечание.** а – по данным (Lewis, Anders, 1988); б – не определено из-за высокой погрешности вычисления; с – вычислено по средневзвешенному изотопному составу ксенона в данном температурном интервале.

зошло после образования Хе-РЗп в туманности. В этом случае повышенное относительное содержание Хе-S в солнечном ксеноне относительно такового в Хе-РЗ могло быть обусловлено, например, основной долей захваченного дополнительного Хе-S в солнечном веществе.

2. При пиролизе до 1200°C кинетика выделения компонентов Хе-РЗп с Хе-S подобна таковой для Хе-рг2п. Это можно видеть, например, по фракции LDA, для которой максимум их выделения наблюдается при 800°C. Такое подобие может свидетельствовать о равной энергии активации атомов ксенона из их фаз носителей. Учитывая относительно низкое выделение Хе-рг2п при более высокой температуре, например, при 1200°C, мы предполагаем, что максимальное выделение этого компонента при 800°C обусловлено дефектностью кристаллической решетки поверхностных слоев зерен SiC-X. Косвенным аргументом, подтверждающим это предположение, может быть тенденция уменьшения выделения компонента Хе-рг2п при температуре до 1200°C в ряду от LDA к LD7: 0.26(7), 0.21(5) и 0.16(5) соответственно. Как видно, повышенная доля соответствует фракции LDA, т. е. более мелкозернистой и более дефектной фракции, тогда как минимальная доля – фракция LD7 – более грубозернистой и менее дефектной.

3. Выделение компонента Хе-рг1п при пиролизе до 1200°C резко отличается от остальных тем, что его содержание резко увеличивается по мере увеличения температуры пиролиза. Такое увеличение соответствует началу роста интенсивной графитизации зерен наноалмаза, которые принимаются фазой носителем компонента Хе-рг1п. Очевидно, что при этом происходит также графитизация зерен алмаза, содержащих Хе-РЗп, но его доля существенно меньше, чем выход Хе-РЗ из алмазоподобной фракции.

4. Величины отношения содержания всего выделенного Хе-рг2п к содержанию Хе-S, выделенного после 1200°C, т. е. без учета Хе-S, связанного с Хе-РЗп, для фракций LDA, LD3 + LD4 и LD7 лежат в ряду 0.151(21), 0.277(21) и 0.186(15) соответственно. Величина этого отношения в соответствии с нашей концепцией должна быть равной 0.241(17) при условии, если содержание Хе-S при температуре выше 1200°C обусловлено зернами SiC-X. Наблюдаемое отклонение от этой величины для фракций LDA и LD7 может быть либо из-за потери Хе-рг2п, либо увеличения содержания зерен SiC, генезис которых не связан со сверхновой II типа. Первое предположение относится к фракции LDA, тогда как второе – в наибольшей степени к LD7. Тем не менее из-за небольшой относительной доли содержания фракций LDA и LD7 (7.75% и 15.24% соответственно) средне-

взвешенное значение отношения Хе-рг2п/Хе-S – 0.220(13) в пределах 1σ погрешности вычислений совпадает с величиной 0.241(17).

5. Величина отношения Хе-рг2п/Хе-рг1п при переходе от фракции LD3+LD4 к LD7 изменяется от 0.41(3) до 0.56(4). Некоторое увеличение отношения обусловлено, вероятно, как различием поверхностной морфологии зерен фаз носителей этих компонентов, а именно, зерен SiC-X и зерен наноалмаза, так и различием в размерах (или термостойкости) зерен этих фаз. Положение фракции LDA относительно этой тенденции неопределенно из-за повышенной погрешности вычисления (0.51(8)).

6. Величина отношения  $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$  для фракции LD7 меньше на 25.2(2)%о, чем в LDA. Учитывая, что относительное содержание Хе-РЗп, выделенного до 1200°C, для этих фракций практически одинаково (около 63%), наблюдаемое уменьшение отношения  $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$  в LD7 связано, наиболее вероятно, с меньшим содержанием компонента Хе-рг1п относительно других компонентов ксенона. Дополнительными факторами этого уменьшения могут быть увеличение доли зерен SiC-X, содержащих компонент Хе-X, а также доли зерен SiC, содержащих только Хе-S.

Анализ полученных данных для фракций DN, DM и DK метеорита Allende CV3 (табл. 3) показал следующее.

1. При температуре пиролиза 800°C для DN и DK фракций и до 1200°C для DM фракции получены следующие данные: а) существенно меньшие интервалы величины отношения Хе-S/ХеРЗп для фракций (0.001–0.005) по сравнению с величиной 0.012 для компонента Хе-РЗ; б) значительно более высокие значения отношения  $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ , чем 0.31, также для Хе-РЗ. Эти данные указывают на то, что во фракциях Allende CV3 практически отсутствует компонент Хе-РЗ. Отсутствие в ОНФ метеорита Allende CV3 относительно низкотемпературного компонента Хе-РЗ обусловлено, наиболее вероятно, термальным метаморфизмом, который претерпело его родительское тело в окислительных условиях при температуре около 600°C (Huss, Lewis, 1994b). Таким образом, согласно нашей концепции, в ОНФ Allende CV3 содержится только почти нормальный по изотопному содержанию компонент Хе-РЗп, содержащийся в зернах наноалмаза.

2. Величина отношения Хе-рг2п/Хе-рг1п при переходе фракции от DN к DK изменяется от 0.265(28) до 0.349(40). Средневзвешенное значение этого отношения для ОНФ Allende равно 0.325(20), тогда как по данным для фракций Murchison CM2–0.450(23) (табл. 2, 3). Повышенное отношение Хе-рг2п/Хе-рг1п для ОНФ Murchison CM2 сопровождается увеличением



**Таблица 3.** Содержания  $^{132}\text{Xe}$  (в  $10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г) и компонентов ксенона (в  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>/г) в обогащенных наноалмазом фракциях метеорита Allende CV3

T/100, °C	$^{132}\text{Xe}^a$	$^{136}\text{Xe}/$ $^{132}\text{Xe}^a$	P3n	pr1n	pr2n	Xe-S	pr2n/ pr1n	pr2n/ XeS
<b>Фракция DN (21.1%)</b>								
8	0.57	0.6465 (19)	56.491 (99)	0.258 (21)	HO <sup>b</sup>	0.26 (7)	HO	HO
16	15.30	0.6764 (4)	1519.7 (1.5)	6.50 (17)	0.75 (18)	3.1 (1.1)	0.115 (28)	0.25 (10)
22	5.05	0.6125 (6)	498.06 (33)	0.725 (67)	1.245 (74)	4.97 (23)	1.72 (19)	0.251 (19)
8÷22 <sup>c</sup>	20.92	0.66016 (33)	2074.3 (1.5)	7.48 (18)	1.98 (20)	8.3 (1.1)	0.265 (28)	0.24 (4)
<b>Фракция DM (7.52%)</b>								
8÷12 <sup>c</sup>	2.62	0.6551 (6)	260.60 (21)	1.165 (33)	HO	0.24 (15)	HO	HO
16	14.8	0.6765 (4)	1469 (1)	5.96 (15)	1.05 (17)	4.16 (86)	0.176 (28)	0.252 (65)
20	7.24	0.61194 (45)	714.10 (60)	1.070 (74)	1.750 (82)	7.08 (43)	1.63 (14)	0.247 (19)
8÷20 <sup>c</sup>	24.66	0.65515 (29)	2443.7 (1.3)	8.20 (16)	2.80 (18)	11.48 (10)	0.341 (23)	0.244 (16)
<b>Фракция DK (1.37%)</b>								
8	0.65	0.6364 (20)	64.61 (21)	0.275 (31)	HO	HO	HO	HO
16	12.9	0.6781 (5)	1282 (2)	5.62 (23)	0.52 (26)	1.8 (1.2)	0.092 (46)	0.29 (24)
23	12.68	0.6308 (7)	1253 (2)	2.75 (19)	2.5 (2)	9.4 (1.1)	0.91 (10)	0.266 (39)
8÷23 <sup>c</sup>	26.23	0.6542 (4)	2600	8.64 (30)	3.02 (33)	11.2 (1.6)	0.349 (40)	0.267 (49)
<b>Средневзвешенный состав (100%)</b>								
	23.89	0.6563 (3)	2368 (1)	8.05 (14)	2.63 (15)	10.8 (8)	0.325 (20)	0.243 (23)

**Примечание.** a, b, c – см. примечание в табл. 2.

относительного содержания Xe-S (в %) в нем относительно таковой для ОНФ Allende CV3 – 0.45(1) и 0.59(2) соответственно. Поэтому наблюдаемое различие отношений Xe-pr2n/Xe-pr1n между Allende и Murchison CM2 находит простое объяснение с учетом того, что в нашей концепции фазой носителем Xe-pr2n являются зерна SiC-X. Оно заключается в том, что термальный метаморфизм при высоких температурах (~600°C для Allende CV3) в окислительных условиях привел к большему разрушению зерен SiC, в том числе зерен SiC-X, чем это произошло для метеорита

Murchison CM2. Температура метаморфизма последнего, как и метеорита Orgueil CI, не превышала 100°C (Huss, Lewis, 1994b). Возможно также, что различие содержаний зерен SiC разного генезиса – это результат различного их содержания в областях формирования родительских тел этих метеоритов.

3. Величины отношения Xe-pr2n/ Xe-S для фракций DN, DM и DK лежат в ряду 0.24(4), 0.240(3) и 0.27(5) соответственно. Можно видеть, что все эти значения, как и средневзвешенная величина (0.243(23)), в отличие от некоторых фрак-

ций Murchison CM2, совпадают со значением 0.241(17). Поэтому можно сделать вывод, что содержание Xe-S в ОНФ Allende обусловлено практически только зернами SiC-X, содержащими компонент Xe-X.

4. Величина отношения  $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$  для грубозернистой фракции DK меньше на 9.0(1)%о относительно тонкозернистой фракции DN. Эта величина меньше, чем наблюдается для фракций LDA, LD7 Murchison CM2 (около 25%о). Вероятно, это различие обусловлено тем, что интервал между значениями отношения Xe-pr2n/Xe-pr1n для фракций ОНФ Murchison CM2 больше, чем для фракций Allende CV3. Вместе с тем для ОНФ метеорита Ефремовка CV3, относящегося также к группе CV3, но испытывавшего термальный метаморфизм в восстановительных условиях, различие между тонко- и грубозернистыми фракциями ED3 ( $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}=0.678(8)$ ) и ED9 ( $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}=0.609(7)$ ), равное 102(2)%о, существенно выше, чем для Allende CV3 (Verchovsky и др., 1998). Эти фракции были получены при помощи метода седиментации при ультрацентрифугировании коллоидного раствора кислотно-нерастворимого остатка метеорита Ефремовка CV3 (Фисенко и др., 1998). Различие между ОНФ метеоритов Allende CV3 и Ефремовка CV3 обусловлено большим содержанием зерен SiC, в том числе зерен SiC-X, в грубозернистой фракции метеорита Ефремовка относительно таковой в Allende CV3. Это может быть связано: а) с различием методов сепарации коллоидного раствора Allende CV3 и Ефремовки CV3; б) с большей степенью сохранности зерен SiC в восстановительных условиях метаморфизма родительского тела Ефремовки CV3 по сравнению с Allende CV3, претерпевшим метаморфизм в окислительных условиях. Какое из этих предположений является реальным остается открытым вопросом на данный момент исследования.

## ВЫВОДЫ

Использование нового компонента с нормальным изотопным составом Xe-P3n позволило привлечь радиоактивные продукты классического г-процесса нуклеосинтеза при взрыве сверхновой II типа для образования компонентов ксенона с аномальным изотопным составом по гипотезе Ott без повышенного содержания изотопа  $^{132}\text{Xe}$  относительно  $^{136}\text{Xe}$ . В результате этого на основании впервые вычисленных изотопных составов потенциально первичных новых компонентов ксенона с аномальным изотопным составом (Xe-pr1n и Xe-pr2n), а также анализа их содержаний в ОНФ метеоритов Murchison CM2 и Allende CV3 были сделаны следующие основные выводы.

1. Первичным компонентом ксенона с почти нормальным изотопным составом в молекулярном облаке был, наиболее вероятно, компонент Xe-P3n, содержащийся в индивидуальной популяции зерен наноалмаза. В результате этого в компонентах с аномальным изотопным составом Xe-HL и Xe-P6e субкомпонентом с нормальным изотопным составом является Xe-P3n. Компонент Xe-P3, идентифицированный в ОНФ метеоритов в работе (Huss, Lewis, 1994a), является результатом смешения компонента Xe-P3n с дополнительной порцией Xe-S, и он содержится в алмазоподобной фазе с более низкой термостабильностью, чем зерна алмаза с Xe-P3n. В первом приближении компонент Xe-P3 мог быть образован на ранних стадиях эволюции протосолнечного облака, т. е. на стадии протекания мощных ударных процессов, приводящих к частичному испарению реликтовых (досолнечных) зерен, в частности, зерен наноалмаза с компонентом Xe-P3n, а также зерен Si-C.

2. В ОНФ метеоритов содержатся два компонента с аномальным изотопным составом Xe-pr1n и Xe-pr2n, образованных при взрыве одной из сверхновых II типа, но существенно отличающихся фазами носителями. Компонент Xe-pr1n содержится в индивидуальной популяции зерен наноалмаза, тогда как Xe-pr2n, согласно нашей концепции, в основном в зернах SiC-X, эволюция которых связана со сверхновой II типа. Величина отношения Xe-pr2n/Xe-S равна 0.241(17). В ОНФ метеорита Murchison CM2, кроме зерен SiC-X, имеются также зерна SiC другого генезиса, содержащие только Xe-S. Имплантация (сорбция) изотопов компонентов Xe-pr1n и Xe-pr2n в зерна наноалмаза и в зерна SiC-X соответственно произошла, вероятно, в турбулентных зонах смешения внешних и внутренних оболочек сверхновой II типа после ее взрыва. Продолжительность захвата этих компонентов, вычисленная согласно гипотезе Ott (1996), составляет 2.12 ч и 1.89 ч соответственно.

3. Зерна SiC в обогащенных наноалмазом фракциях Allende CV3 относятся в основном к типу зерен SiC-X. Поэтому для анализа зерен SiC-X, генезис которых связан с взрывом сверхновой II типа, наиболее перспективным объектом исследования является кислотно-нерастворимый остаток метеорита Allende CV3.

Успешные вычисления содержаний потенциально первичных новых компонентов Xe-P3n, Xe-pr1n и Xe-pr2n на основании измеренных изотопных составов и содержаний ксенона и интерпретации их соотношений в ОНФ метеоритов Allende CV3 и Murchison CM2 позволяет считать эти компоненты реальными и тем самым приемлемыми для анализа ксенона в других метеоритах.

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., Аронин А.С., Митрохин Ю.И., Большева Л.Н.* Сепарация межзвездного алмаза на фракции по размерам частиц // Геохимия. 1998. № 5. С. 532–535.
- Фисенко А.В., Семенова Л.Ф.* Наноалмаз метеоритов: альтернативный состав компонентов ксенона // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 3. С. 278–288. (*Fisenko A.V., Semjonova L.F.* Meteoritic nanodiamonds: Alternative composition of xenon components // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 3. С. 253–262).
- Фисенко А.В., Семенова Л.Ф.* Наноалмаз метеоритов: концентрации и кинетика выделения возможных компонентов ксенона // Геохимия. 2022. Т. 67. № 6. С. 526–533.
- Фисенко А.В., Семенова Л.Ф., Павлова Т.А.* К вопросу о фазе-носителе изотопно-аномальной компоненты Хе-р<sub>2</sub> в обогащенных наноалмазами фракциях метеоритов // Тр. ВЕСЭМПГ-2022. С. 331–335.
- Фисенко А.В., Семенова Л.Ф., Павлова Т.А.* Вариации содержания потенциально первичных компонентов ксенона в обогащенных наноалмазом фракциях Murchison и Allende // Тр. ВЕСЭМПГ-2023 (в печати).
- Clayton D.D.* Of origin of heavy xenon in meteoritic diamonds // Astrophys. J. 1989. V. 340. P. 613–619.
- Fisenko A.V., Verchovsky A.B., Semjonova L.F.* Kinetics of Хе-Р<sub>3</sub> release during pyrolysis of the coarse-grained fractions of Orgueil (CI) meteorite nanodiamonds // Meteorit. and Planet. Sci. 2014. V. 49. P. 611–620.
- Fisenko A.V., Semjonova L.F.* Nanodiamond of meteorites: is the SiC-X phase a carrier of the isotopically anomalous component Хе-р<sub>2</sub>? // LPS. 2022. LIII. Abstract#1333.pdf.
- Fisenko A.V., Semjonova L.F., Pavlova T.A.* Nanodiamonds of meteorites: correction results of isotopic compositions of xenon components // LPS. 2023. LIV. Abstract #1007.pdf.
- Gilmour J.D., Verchovsky A.B., Fisenko A.V., Holland G., Turner G.* Xenon isotopes in size separated nanodiamonds from Efremovka: <sup>129</sup>Xe\*, Хе-Р<sub>3</sub>, and Хе-Р<sub>6</sub> // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. P. 4133–4148.
- 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 Хе-Н // 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: Implications of ion implantation experiments with synthetic nanodiamonds // Meteoritics and Planet. Sci. 2008. V. 43. № 11. P. 1811–1826.
- Koscheev A.P., Gromov M.D., Mohapatra K., Ott U.* History of trace gases in presolar diamonds inferred from ion-implantation experiments // Nature. 2001. V. 412. P. 615–617.
- Kouchi A., Nakano H.* Novel routes for diamond formation in interstellar ices and meteoritic parent bodies // Astrophys. J. 2005. V. 626. P. 129–132.
- Lewis R.S., Anders E.* Xenon-HL in diamonds from Allende meteorite – composite nature // LPS. 1988. XIX. P. 679–680.
- Lewis R.S.* Precision noble gas measurements in presolar diamonds // LPS. 1994. XXV. P. 793–794.
- 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.
- Nittler L.R., Hoppe P.* Are presolar silicon carbide grains from novae actually from supernovae? // Astrophys. J. 2005. V. 631. P. L89–L92.
- Ott U.* Interstellar diamond xenon and time scales of supernova ejecta // Astrophys. J. 1996. V. 463. P. 344–348.
- Verchovsky A.B., Fisenko A.V., Semjonova L.F., Wright L.P., Lee M.R., Pillinger C.T.* C, N, and noble gases isotopes in grain size separates of presolar diamonds from Efremovka // Science. 1998. V. 281. P. 1165–1168.
- Verchovsky A.B., Fisenko A.V., Semjonova L.F., Bridges J., Lee M.R., Wright J.P.* Nanodiamonds from AGB stars: a new type of presolar grains in meteorites // Astrophys. J. 2006. V. 651. P. 481–490.