

## Исследование изотопного и элементного состава газов метеорита Песьяное с применением метода ступенчатого дробления

А. И. Буйкин<sup>1</sup>, А. Б. Верховский<sup>2</sup>, К. А. Лоренц<sup>1</sup>, А. Я. Скрипник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва

<sup>2</sup>Открытый Университет, Англия

[bouikine@mail.ru](mailto:bouikine@mail.ru)

Впервые для метеоритов проведено изучение изотопного состава Ar, N<sub>2</sub>, Ne и элементных соотношений He, Ar, Ne и N<sub>2</sub> во флюидных включениях в пироксенах разных генераций из метеорита Старое Песьяное. Образцы содержат во включениях азот с близким изотопным составом (от -12 до -30 ‰ Atm), но отличаются по изотопному составу аргона: Pх-В содержит более радиогенный аргон (<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar = 110–170), тогда как Pх-G содержит аргон с большим вкладом солнечного компонента и узким диапазоном отношений <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar (35–42). Образцы также отличаются по изотопному составу неона – в Pх-В он существенно более космогенный. Показано также, что легкий азот содержится преимущественно во включениях; выдвинуто предположение, что тяжелый компонент азота (с положительными значениями δ<sup>15</sup>N) может быть первично-магматическим.

*Ключевые слова:* Песьяное, He, Ne, Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, флюидные включения, метод ступенчатого дробления

**Ссылка:** Буйкин, А. И., А. Б. Верховский, К. А. Лоренц, А. Я. Скрипник (2012), Исследование изотопного и элементного состава газов метеорита Песьяное с применением метода ступенчатого дробления, *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ\_ASEMPG.

Метеорит Песьяное относится к энстатитовым ахондритам (обритам) и представляет собой полимиктовую реголитовую брекчию [Lorenzetti S. et al., 2003]. Метеорит сложен фрагментами энстатитовых пироксенитов нескольких типов, два из которых содержат зерна пироксенов, богатые флюидными включениями [Lorenz C. et al., 2005]. Для того, чтобы получить изотопные характеристики газов, захваченных в минералы в виде флюидных включений в ходе дифференциации родительского тела метеорита, мы проанализировали два образца пироксенов разных популяций: темный пироксен (Pх-G), содержащий большое количество флюидных включений, и светлый непрозрачный пироксен (Pх-В), с меньшим количеством флюидных включений. Газы выделялись методом ступенчатого дробления. После дробления, оставшаяся пудра изучалась методом ступенчатого отжига, чтобы сравнить состав газов во включениях и в матрице минералов.

### Методика

Метод ступенчатого дробления позволяет выделять газы, находящиеся в газовой-жидких (флюидных) включениях в породах и минералах, не затрагивая газовые компоненты, связанные в кристаллической решетке минерала. Иногда газы в достаточном большом (достаточном для анализа) количестве могут находиться в микродефектах решетки (например, вызванных радиоактивным распадом *in situ*, или имплантацией космогенных атомов и ионов). Такие газы также могут быть частично выделены с помощью ступенчатого дробления.

Методика пробоподготовки, выделения и разделения газов заключалась в следующем. Отобранные под биноклем мономинеральные фракции (~1 г каждого образца) очищались от поверхностных загрязнений в этаноле в ультразвуковой ванне, после чего их помещали в сушильный шкаф на 2–3 часа. После сушки образцы загружались в трубки дробления, которые подсоединялись к вакуумной системе. Всю систему прогревали при 120 °С и откачивали на высокий вакуум (10<sup>-8</sup> торг) в течение 12-24 часов для удаления поверхностно-сорбированных газов. Выделение газов из образцов проводилось дроблением ступенчато. Выделенные в каждой ступени газы криогенно разделялись и напускались в камеру масс-спектрометра для изотопного анализа. Аргон и гелий дополнительно проходили очистку на Zr-Al геттерах. Для избавления от возможных интерферирующих масс (в основном от присутствия CO) азот также

## БУЙКИН И ДР.: ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА

дочищался на CuO при температуре 800 °С. Образованный при этом диоксид углерода замораживался на «холодном пальце» при температуре -170 °С. Подробное описание методики опубликовано в работе [Буйкин и др., 2010].

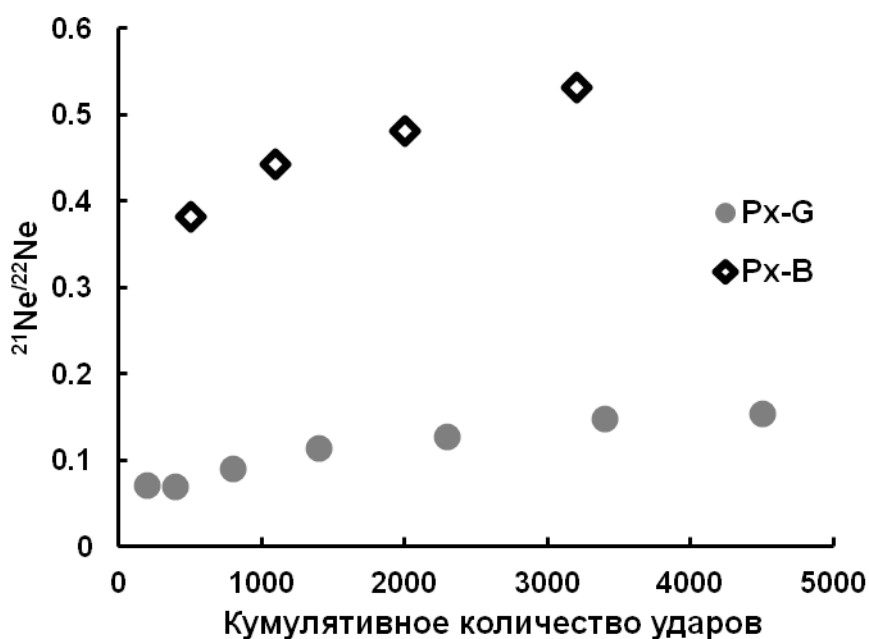
Изотопный анализ аргона и азота проводился на высокочувствительном масс-спектрометрическом комплексе Finesse в Открытом Университете (Милтон Кинс, Великобритания), там же были получены данные по содержанию гелия и углерода (в форме CO<sub>2</sub>) в исследуемых образцах. Следует отметить, что анализ He, C, N и Ar проводился одновременно из одной навески каждого образца. Краткое описание этой методики имеется в работе [Verchovsky et al., 2002]. Предварительно нами была изучена «аликвота» образца Px-G: изотопный состав углерода и кислорода в выделенном CO<sub>2</sub> измерялся на масс-спектрометре Thermo Finnigan Delta Plus (ГЕОХИ РАН) с использованием системы «microvolume» с «холодным пальцем», обеспечивающей надежное измерение малых количеств газа (0.005–0.02 см<sup>3</sup>).

### Результаты и дискуссия

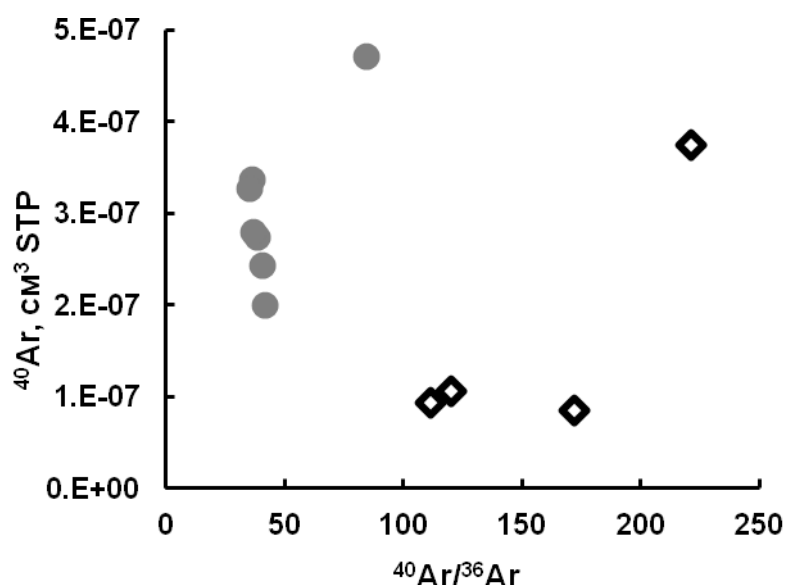
При дроблении выделилось лишь небольшое количество CO<sub>2</sub> (несколько нг углерода), что не позволило получить надежные данные по изотопному составу углерода из-за высокого вклада бланка. Но похоже, значения  $\delta^{13}\text{C}$  отрицательные (в интервале -10‰ ÷ -20 ‰ PDB), что подтверждается и данными, полученными нами в ГЕОХИ РАН по аликвоте образца Px-G: на ступени в 400 ударов было выделено около  $5 \times 10^{-3}$  см<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> с  $\delta^{13}\text{C} = -11.1 \pm 0.1$  PDB.

По общему содержанию гелия, неона, аргона и азота наши данные согласуются с данными ступенчатого отжига для светлого и темного петрологических типов метеорита Песьяное [Mathew K.J. and Marti K. 2003]. Px-G содержит больше газов во включениях, чем Px-V. Количество гелия и аргона, выделенных при дроблении, сопоставимо с их количеством, выделенном с помощью плавления оставшейся после дробления пудры. Доля выделенного при дроблении <sup>21</sup>Ne составляет около 10% от количества этого изотопа, выделенного с помощью плавления; для азота это соотношение еще в 10 раз меньше.

Изотопный состав неона в образцах отражает доминирование космогенного компонента. В целом, неон, выделенный при дроблении Px-V, содержит в 3–4 раза большее количество космогенного компонента во включениях, чем Px-G (рис. 1). Это также отражается в более высоких отношениях <sup>38</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar (большая доля космогенного аргона) в Px-V. Увеличение вклада космогенного компонента с количеством ударов по образцу говорит о том, что этот компонент находится в наиболее мелких включениях и/или дефектах кристаллической решетки. Часть космогенных (и солнечных) газов, накопленных ранее в реголите, могла быть захвачена во включения в ходе ударного события, попав в микротрещины в зернах пироксена, которые преимущественно приурочены к направлению спайности. Наложенный термальный метаморфизм залечил эти микротрещины и запер газы внутри зерен в виде относительно крупных включений. Поэтому на первых ступенях дробления наблюдается выход солнечных газов с одной стороны, и большой вклад космогенного компонента неона – с другой. Такой механизм согласуется с нашим опытом исследования мантийных пород, из которого следует, что в более мелких включениях обычно содержатся первично-магматические газы, которые выделяются на последних ступенях дробления, в то время, как вторичные включения часто более крупные и вскрываются на начальных ступенях дробления [Buikin et al., 2005]. Увеличение доли космогенного компонента неона с увеличением количества ударов по образцу (степени измельчения пробы), вероятно, должно объясняться выделением небольшой части космогенного неона, расположенного в микронных и субмикронных нарушениях решетки, возникающих в процессе образования этого компонента неона. О такой возможности для гелия сообщалось, например, в работе [Scarsi 2000].



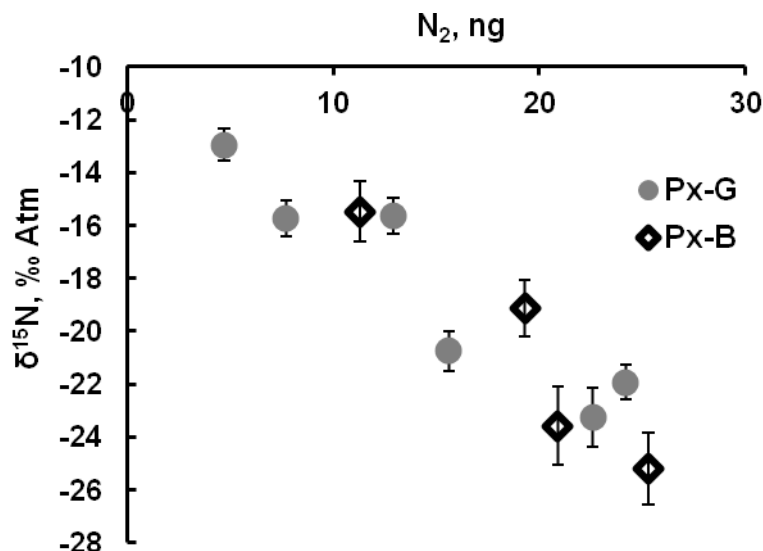
**Рис. 1.** Зависимость отношения  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  от кумулятивного количества ударов. Вклад космогенного компонента (изотопа Ne-21) увеличивается с количеством ударов по образцу (степенью раздробленности образца).



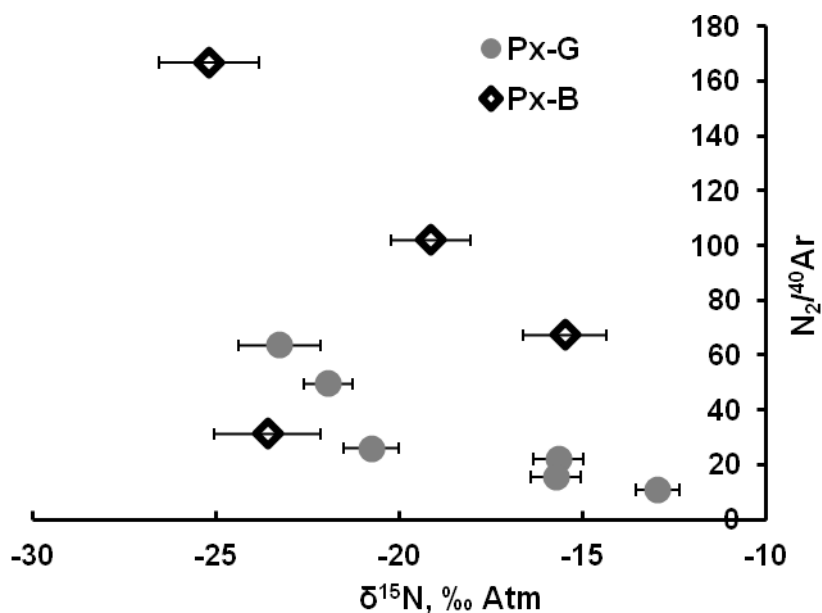
**Рис. 2.** Диаграмма в координатах  $^{40}\text{Ar}$ – $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  для фракций дробления образцов Px-G и Px-B. Обозначения те же, что и на рис. 1. Две точки (по одной для каждого образца) с наибольшим содержанием  $^{40}\text{Ar}$  имеют и наиболее высокие отношения  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  в данном образце и указывают на артефакт, связанный с большой примесью атмосферного компонента, которую не удалось учесть при вычитании бланка.

Изотопный состав аргона в этих двух породах существенно отличается (рис. 2): для Px-G отношения  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  варьируют между 36 и 42 (за исключением первой фракции, в которой довольно сильно сказывается атмосферная контаминация); во включениях в Px-B отношения  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  изменяются в диапазоне 220-110, указывая на больший вклад радиогенного аргона. Отметим, что здесь не идет речь об *in situ* радиогенном аргоне, поскольку мы изучали мономинеральные образцы пироксенов. По-видимому, Px-B захватил включения с аргоном, отличным по происхождению от источника аргона образца Px-G.

Изотопный состав азота, выделенного дроблением, близок в обоих образцах. Значения  $\delta^{15}\text{N}$  варьируют во фракциях дробления между -25 и -13 ‰ атм. При последующем ступенчатом отжиге выделялся изотопно более тяжелый азот, в котором значения  $\delta^{15}\text{N}$  достигали +16‰ (и до +44‰ в темном петрологическом типе согласно работе [Mathew K.J. and Marti K. 2003]). Значения  $\delta^{15}\text{N}$  во фракциях дробления хорошо коррелируют с содержанием азота: чем меньше азота во фракции, тем более высокие значения  $\delta^{15}\text{N}$  в ней (рис. 3). Такая же корреляция наблюдается на диаграмме  $\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2/\text{Ar}$  (рис. 4): чем ниже отношения азота к аргону, тем выше значения  $\delta^{15}\text{N}$ .



**Рис. 3.** Зависимость значений  $\delta^{15}\text{N}$  от содержания азота в ступенях дробления в светлом (Px-B) и темном (Px-G) петрологических типах метеорита Песьяное.



**Рис. 4.** Корреляции между отношением  $\text{N}_2/^{40}\text{Ar}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  в ступенях дробления в светлом (Px-B) и темном (Px-G) петрологических типах метеорита Песьяное.

Такие корреляции могут указывать на смешение двух разных источников, либо на сильное элементное и изотопное фракционирование в ходе захвата включений. Как известно, азот и аргон характеризуются близкой растворимостью в силикатных расплавах [Marty and Zimmermann 1999] и не должны фракционировать в ходе дегазации расплава и образования пузырьков. Фракционирование между аргонном и азотом может произойти при распределении

## БУЙКИН И ДР.: ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА

между расплавом и твердой фазой, например, осборнитом ( $TiN_x$ ) или троилитом ( $FeS$ ), которые наблюдаются в виде включений в пироксене метеорита Песьяное. С другой стороны, на первых ступенях дробления газы выделяются из более крупных и менее устойчивых включений. Такие включения описаны выше для Рх-Г как вторичные, которые могли образоваться в результате перераспределения имплантированных солнечных газов при ударном событии, приведшем к формированию брекчии. Действительно, в первых ступенях дробления выделяется азот с большей пропорцией легкого солнечного компонента. С увеличением количества ударов по образцу вскрываются все более мелкие (первичные?) включения и микродефекты, в том числе, образованные космогенными газами, и, соответственно, увеличивается пропорция космогенного неона и аргона. В то же время, с увеличением количества ударов увеличивается пропорция тяжелого азота, указывая на то, что изотопно тяжелый компонент азота может быть первично магматическим.

### Выводы

1) большая часть  $^4He$  и  $^{36}Ar$ , выделенные из Песьяного при дроблении, представляют, по-видимому, газы солнечного ветра, захваченные в поровое пространство этой брекчии во время ее формирования из реголитового материала;

2) небольшая часть космогенного  $^{21}Ne$  была выделена в ходе дробления – вероятнее всего, из нарушений на микроуровне. Большая доля  $^{21}Ne$  была образована *in situ* после образования брекчии;

3) азот, выделенный в ходе ступенчатого дробления, наиболее обогащен солнечным компонентом, хотя его доля относительно мала. В азоте Песьяного доминируют другие – изотопно тяжелые компоненты, среди которых может быть и первично-магматический.

*Работа проведена при финансовой поддержке программы ОНЗ РАН №4 и гранта РФФИ №09-05-00678а.*

### Литература

Buikin, A. et al. (2010). *Vestnik Otdelenia nauk o Zemle RAS*, V. 2, NZ6007, doi:10.2205/2010NZ000025.

Buikin, A. et al. (2005). *Earth and Planet. Sci. Letter*, v. 230, pp. 143-162.

Clayton, R. N., T. K. Mayeda (1996). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 60, pp. 1999–2017.

Keil, K. (1989). *Meteoritics*, V. 24, pp. 195–208.

Lindsley, D., D. Andersen (1983). *Proc. LPSC 13, JGR*, 88, A887–A906.

Lorenz, C. et al. (2005). *LPSC 36*, Abstract #1612.

Lorenzetti, S. et al. (2003). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 67, pp. 557–571.

Marty, B., L. Zimmermann (1999). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 63, pp. 3619-3633.

Mathew, K. J., K. Marti (2003). *Meteoritics & Planet. Sci.*, v. 38, pp. 627-643.

Scarsi, P. (2000). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 64, №21, pp. 3751-3762.

Stoeffler, D. et al. (1988). In: *Meteorites and the early solar system. Tucson, AZ, University of Arizona Press*, pp. 165–202.

Verchovsky, A. et al. (2002). *Earth and Planet. Sci. Letters*, v. 199, pp. 243–255.