

Радиационный возраст ископаемых метеоритов Швеции

В. А. Алексеев

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

Выполнен анализ данных *Heck et al.* [2004, 2008] о содержании ^4He , $^{20,21,22}\text{Ne}$ и радиационного возраста для хромитовых зёрен, выделенных из ископаемых метеоритов (L-хондритов), найденных в карьерах Thorsberg и Gullhogen на юге Швеции в морских известняках – отложениях среднего ордовика. Выявленные закономерности, а также находки практически всех ископаемых метеоритов на небольшой площади (~6000 м²) могут быть объяснены в предположении падения одного метеорита, выпавшего в виде метеоритного дождя, менее чем через 0.2 млн. лет после катастрофического разрушения родительского тела L-хондритов ~470 млн. лет назад. Время этого падения соответствует времени формирования в карьере Thorsberg самого древнего пласта с фрагментами метеорита. Фрагменты метеорита в более молодых пластах оказались, вероятнее всего, в результате последующего переотложения в условиях мелководного моря в процессе формирования осадочной толщи. В рамках этого предположения нет необходимости в привлечении гипотезы интенсивного потока метеоритов на Землю в течение ~1-2 млн. лет около 470 млн. лет назад для объяснения характера распределения ископаемых метеоритов в отложениях среднего ордовика в Швеции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *ископаемые метеориты; ордовик; радиационные возрасты метеоритов.*

Ссылка: В. А. Алексеев (2010), Радиационный возраст ископаемых метеоритов Швеции, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6003, doi:10.2205/2010NZ000021, 2010

Введение

В отложениях известняков в среднем ордовике (~480 млн. лет) на юге Швеции в карьере Thorsberg найдено более 80 ископаемых метеоритов размером от ~1 до 20 см в диаметре [*Schmitz et al.*, 1997; *Schmitz et al.*, 2001; *Schmitz et al.*, 2003; *Schmitz et al.*, 2009; *Heck et al.*, 2004]. За время нахождения в известняках все первичные минералы метеоритов, за исключением хромитов, в процессе диагенеза были почти полностью замещены карбонатами и, в меньшей степени, слоистыми силикатами, сульфатами и фосфатами [*Schmitz et al.*, 2001; *Schmitz et al.*, 1996; *Bridges et al.*, 2007]. Химический состав хромитовых зёрен [*Schmitz et al.*, 2001], данные по изотопному составу кислорода [*Greenwood et al.*, 2007], а также петрографические данные [*Bridges et al.*, 2007] дали основание классифицировать ископаемые метеориты как L-хондриты и, т.о., отнести их к фрагментам астероида – родительского тела L-хондритов, претерпевшего катастрофическое разрушение около 500 млн. лет назад [*Keil et al.*, 1994; *Bogard*, 1995]. Привлечение усовершенствованного варианта ^{40}Ar - ^{39}Ar метода определения возраста газодержания метеоритов позволило определить, что катастрофа произошла 470 ± 6 млн. лет назад [*Korochantseva et al.*, 2007].

В карьере Thorsberg, наряду с метеоритами, были найдены также реликтовые осадочно-дисперсные внеземные хромитовые зёрна – SEC зёрна (sediment-dispersed extraterrestrial chromite). Средний размер таких зёрен, так же как и хромитовых зёрен из ископаемых метеоритов, составил ~80-100 мкм. Аналогичные зёрна были также найдены и в других местах на юге Швеции в осадочных слоях, одновозрастных со слоями, в которых были найдены ископаемые метеориты [*Schmitz et al.*, 2003; *Schmitz and Haggstrom*, 2006]. Первоначально *Schmitz* и др. [*Schmitz et al.*, 2003] предположили, что эти зёрна являются остатками распавшихся малых метеоритов диаметром ~0.1-1 см. Однако в дальнейшем было найдено, что многие SEC зёрна содержат очень высокие содержания захваченных газов (He и Ne) солнечного состава [*Heck et al.*, 2008; *Meier et al.*, 2008]. Этот факт позволил предположить,

что значительная часть SEC зёрен представляет собой скорее микрометеориты или их фрагменты, чем остатки более значительных по размерам метеоритов [Heck et al., 2008].

Высокая распространённость ископаемых метеоритов и реликтовых хромитовых зёрен дали основание для предположения, что поток внеземного вещества на Землю в течение периода формирования отложений в ордовике был, по крайней мере, на два порядка величины выше, чем в настоящее время [Schmitz et al., 2003].

Значения радиационного возраста ископаемых метеоритов, рассчитанные Heck и др. [Heck et al., 2004] по содержанию космогенного ^{21}Ne , оказались менее или ~ 1 млн. лет и *увеличивались с стратиграфической высотой* нахождения метеоритов в отложении в соответствии с оцененной продолжительностью формирования этого отложения (~ 1 -2 млн. лет). Согласно Heck и др. [Heck et al., 2004], эти данные свидетельствуют о *продолжительном* (в течение нескольких миллионов лет) интенсивном выпадении на Землю метеоритов после разрушения родительского тела (астероида) L-хондритов. Вместе с тем, анализ данных, полученных Heck и др. [Heck et al., 2004], показал, что выявленные особенности в распределениях радиационного возраста и содержания благородных газов могут быть объяснены в рамках предположения падения одного метеорита, выпавшего в виде обширного метеоритного дождя ~ 470 млн. лет назад [Alexeev, 2009].

В дальнейшем Heck и др. [Heck et al., 2008] провели исследование ископаемого метеорита, найденного в карьере Gullhogen, находящемся в 35 км от карьера Thorsberg. В данном сообщении представлены результаты анализа всех данных, опубликованных в работах Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008], и альтернативное объяснение данных, полученных при исследовании ископаемых метеоритов Швеции.

Особенности распределений содержания благородных газов в ископаемых метеоритах и их радиационного возраста

Ниже приведён анализ данных для 24 образцов зёрен из 10 ископаемых метеоритов. Выявленные особенности в распределениях содержаний благородных газов и значений радиационного возраста наиболее чётко проявились при рассмотрении отдельно метеоритов двух групп. В первую (Ark-группу) входят 7 образцов из 3 метеоритов (Ark 002, 007 и 030), найденных в самом нижнем осадочном пласте Arkeologen – наиболее обогащённом метеоритами.

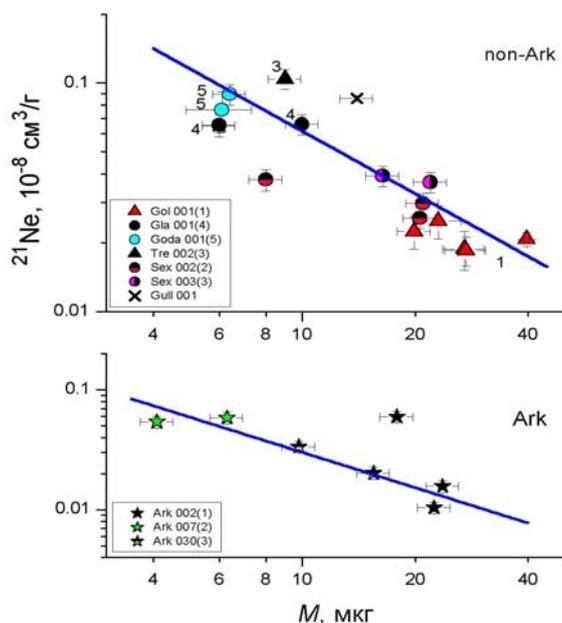


Рис. 1. Содержание ^{21}Ne в зависимости от массы (M) образцов хромитовых зёрен из ископаемых метеоритов (по данным Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008]). Условные обозначения метеоритов соответствуют таковым в Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008]. В скобках приведены индексы сохранности зёрен. Прямые – линии регрессии. non-Ark и Ark – Данные для двух групп метеоритов (см. текст).

Вторая группа (*non-Ark*) состоит из остальных 17 образцов из семи метеоритов (Gla 001; Goda 001; Tre 002; Sex 002, 003; Gol 001 и Gull 001). Обозначения метеоритов приведены согласно Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008]. При анализе распределения радиационного возраста образцов были использованы значения возраста, рассчитанные авторами по содержанию космогенного $^{21}\text{Ne}_{\text{косм}}$ в хромитовых зёрнах и скорости его образования $P_{21} = (7.04 \pm 0.65) \times 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ млн. лет}^{-1}$ [Heck et al., 2008].

1. Основная особенность, которая была отмечена ранее для меньшего объёма данных [Alexeev, 2009] – это чёткая отрицательная корреляция между массой образца и измеренными в нём содержаниями ^4He , ^{20}Ne , ^{21}Ne и ^{22}Ne . Содержания этих газов в образцах изменялись более чем на один порядок: $(\sim 1-200) \times 10^{-5}$, $(\sim 1-20) \times 10^{-8}$, $(\sim 1-10) \times 10^{-10}$ и $(\sim 1-16) \times 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ соответственно. Масса каждого образца (от одного до нескольких хромитовых зёрен средним размером $\sim 80-100 \text{ мкм}$) составляла от 4 до 40 мкг. На рис. 1 в логарифмическом масштабе показана зависимость содержания ^{21}Ne от массы образца. Параметры уравнения линий регрессии для метеоритов обеих групп (*Ark* и *non-Ark*) приведены в табл. 1. Коэффициенты корреляции R между рассматриваемыми величинами даны в табл. 2. Видно, что значения коэффициентов b и R значимо отличаются от нуля. Аналогичные отрицательные корреляции найдены при рассмотрении зависимости между массой образцов и содержаниями ^4He , ^{20}Ne и ^{22}Ne (табл. 1 и 2). При рассмотрении данных для всех метеоритов в целом (табл. 2) значения коэффициентов корреляции для изотопов неона уменьшаются, но остаются значимыми.

Таблица 1. Параметры уравнения линий регрессии вида $\lg Y = a + b \times \lg M$ в зависимостях содержания благородных газов (^4He и $^{20,21,22}\text{Ne}$) и радиационного возраста (T_{21}) от массы (M , г) образцов хромитовых зёрен для двух групп ископаемых метеоритов из карьеров Thorsberg и Gullhogen, южная Швеция

Y	<i>non-Ark</i> *		<i>Ark</i> *	
	a	b	a	b
$^4\text{He}, \text{см}^3 \text{ г}^{-1}$	-9.0 ± 0.3	-1.03 ± 0.06	-20.5 ± 1.1	-3.30 ± 0.21
$^{20}\text{Ne}, \text{см}^3 \text{ г}^{-1}$	-14.2 ± 0.3	-1.39 ± 0.06	-10.7 ± 0.4	-0.70 ± 0.08
$^{21}\text{Ne}, \text{см}^3 \text{ г}^{-1}$	-13.8 ± 0.2	-0.91 ± 0.05	-14.4 ± 0.5	-0.98 ± 0.10
$^{22}\text{Ne}, \text{см}^3 \text{ г}^{-1}$	-16.0 ± 0.5	-1.57 ± 0.10	-12.8 ± 0.5	-0.92 ± 0.09
$T_{21}, \text{млн. лет}$	-3.4 ± 0.4	-0.62 ± 0.08	-6.4 ± 0.7	-1.12 ± 0.15

* *non-Ark* – Метеориты Gla 001 (2 образца), Goda 01 (2), Tre 002 (1), Sex 002 (3), Sex 003 (2), Gol 001 (5) и Gull 001 (2); *Ark* – Ark 002 (3), Ark 007 (2) и Ark 030 (2). Обозначения метеоритов даны согласно Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008].

Таблица 2. Коэффициенты корреляции R между массой образца и (1) содержанием благородных газов (^4He и $^{20,21,22}\text{Ne}$) в хромитовых зёрнах из ископаемых метеоритов и (2) радиационным возрастом (T_{21}) метеоритов

Метеориты	^4He	^{20}Ne	^{21}Ne	^{22}Ne	T_{21}
<i>non-Ark</i> *	-0.55 ± 0.17	-0.87 ± 0.06	-0.84 ± 0.07	-0.89 ± 0.05	-0.69 ± 0.13
<i>Ark</i> *	-0.95 ± 0.04	-0.98 ± 0.02	-0.95 ± 0.04	-0.96 ± 0.03	-0.83 ± 0.12
Все	-0.64 ± 0.12	-0.76 ± 0.09	-0.74 ± 0.09	-0.81 ± 0.07	-0.47 ± 0.16

* См. примечание к табл. 1.

2. Ещё одна характерная особенность в распределении содержаний благородных газов состоит в следующем. Исследованным образцам хромитов Heck и др. [Heck et al., 2004] присвоили пять индексов сохранности. Наиболее сохранившиеся зёрна с большой гладкой блестящей чёрной поверхностью отнесены к индексу сохранности, равному 1, тогда как наименее сохранившиеся зёрна с неровной поверхностью и с многочисленными трещинами – к индексу 5. Последние обычно редки и малы. Остальным зёрнам присвоены промежуточные значения индексов согласно степени их сохранности. Как видно из рис. 1, образцы, содержащие зёрна с хорошей сохранностью (с индексами 1 и 2: Gol 001, Sex 002, Ark 002), группируются преимущественно в области низких содержаний ^{21}Ne и, соответственно, высоких масс. И, напротив, образцам с менее сохранившимися зёрнами (с индексами 4 и 5: Goda 001, Gla 001)

соответствуют более высокие содержания ^{21}Ne и малые массы. Эта особенность проявляется также и для ^4He , ^{20}Ne и ^{22}Ne .

3. Примечательна обнаруженная отрицательная корреляция между значениями радиационного возраста и массой образца как для всех метеоритов в целом, так и, особенно, для метеоритов в группах *non-Ark* и *Ark* (табл. 1, 2; рис. 2). Так, для метеоритов группы *non-Ark* уменьшение массы от 40 до 6 мкг сопровождается увеличением возраста этих образцов более чем в 3 раза – от 0.25 до 0.79 млн. лет. Для метеоритов *Ark*-группы при аналогичном уменьшении массы в ~ 5 раз (от 22.5 до 4.1 мкг) возраст увеличивается более чем в 5 раз (от ~ 0.04 до 0.21 млн. лет). При этом для всех метеоритов сохраняется отмеченная выше особенность: образцы с зёрнами хорошей сохранности (с индексами 1 и 2), группируются преимущественно в области низких значений T_{21} и, соответственно, высоких масс. И напротив, образцам с менее сохранившимися зёрнами соответствуют более высокие возрасты и малые массы.

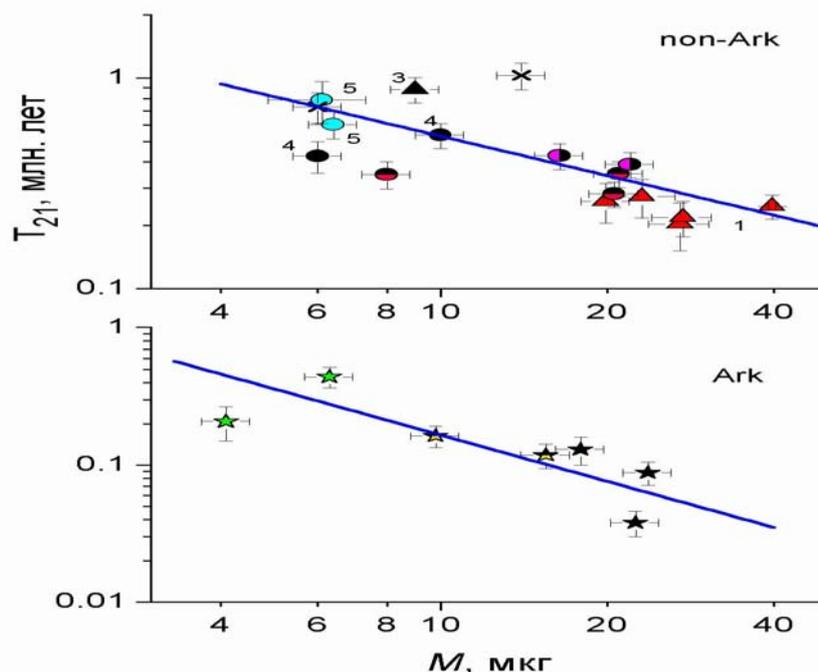


Рис. 2. Значения радиационного возраста ископаемых метеоритов (T_{21}) в зависимости от массы образцов хромитовых зёрен (по данным Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008]). Условные обозначения см. на рис. 1.

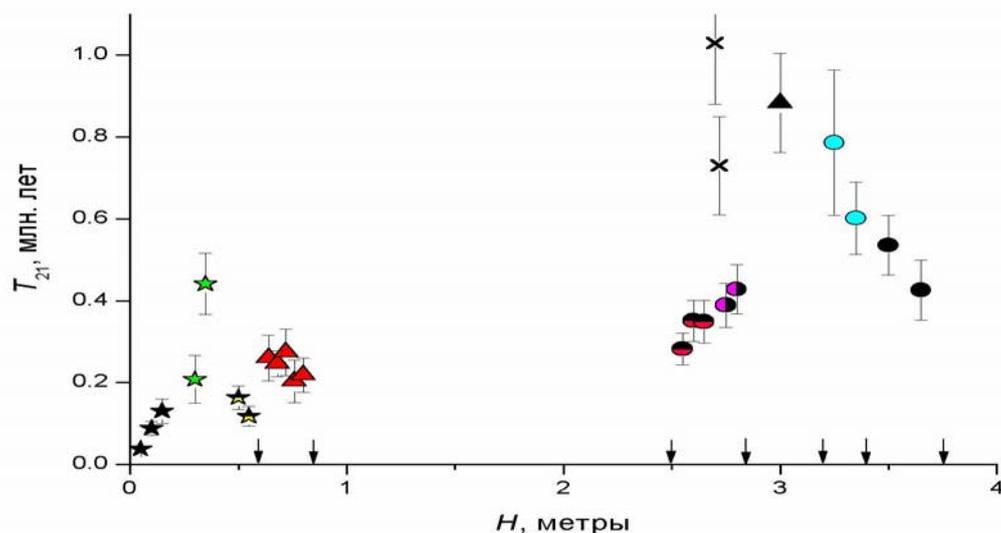


Рис. 3. Распределения значений радиационного возраста (T_{21}) ископаемых метеоритов по глубине их залегания (H). Значение $H = 0$ соответствует основанию пласта Archeologian; значения $H > 0$ отвечают более молодым, позже сформировавшимся отложениям. Вертикальными стрелками

обозначены границы пластов (по данным Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008]). Условные обозначения см. на рис. 1.

4. На рис. 3 показано распределение значений возраста метеоритов в зависимости от глубины их залегания H в осадочной колонке согласно данным Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008]. Здесь и далее глубина залегания метеоритов дана относительно основания самого нижнего пласта – Arkeologen ($H = 0$); значения $H > 0$ соответствуют более молодым, позже сформировавшимся пластам. Границы пластов указаны согласно данным [Schmitz et al., 2001; Heck et al., 2004; Heck et al., 2008].

Согласно данным, приведённым на рис. 3, наблюдается тенденция увеличения T_{21} с ростом глубины залегания метеоритов. Однако, для разных метеоритов эта тенденция неоднозначна. Так, среднее значение радиационного возраста 5 образцов хромитовых зёрен из метеорита Gol 001 составляет 0.24 ± 0.03 млн. лет. Для пяти образцов из двух других метеоритов (Sex 002 и Sex 003) средний возраст $T_{21} = 0.35 \pm 0.03$ млн. лет. Метеориты этих двух групп разделены ~ 2 -хметровой осадочной толщей, продолжительность формирования которой, при средней скорости накопления ~ 2 мм/1000 лет [Schmitz et al., 2001], составит ~ 1 млн. лет, что существенно больше различия между найденными средними значениями возрастов метеоритов этих двух групп (~ 0.11 млн. лет).

Подобное нарушение тенденции можно также увидеть на рис. 3 при рассмотрении значений возраста метеоритов Gull 001, Tre 002, Goda 001 и Gla 001, найденных в 4 различных пластах на глубинах $H > 2.5$ м. Радиационный возраст этих метеоритов при увеличении H проявляет тенденцию скорее к понижению, чем к росту. При этом понижение возраста метеоритов Tre 002, Goda 001 и Gla 001 с ростом H сопровождается уменьшением степени сохранности хромитовых зёрен, выделенных из этих метеоритов: индексы сохранности равны 3, 4 и 5 соответственно.

5. Отметим также характерное различие распределений величины отношения $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ в современных L-хондритах и ископаемых метеоритах (вставка на рис. 4). Из 274 современных L-хондритов только 9 метеоритов (т.е. около 3%) лежат в области значений $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} > 5$, тогда как значения $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ для всех ископаемых метеоритов приходятся на эту область.

6. Современным L-хондритам с значениями $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} > 5$ свойственны высокие содержания ^{20}Ne (более 3×10^{-7} см³ г⁻¹), тогда как у всех ископаемых метеоритов содержание ^{20}Ne менее этой величины, несмотря на высокие значения отношения $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ (рис. 4).

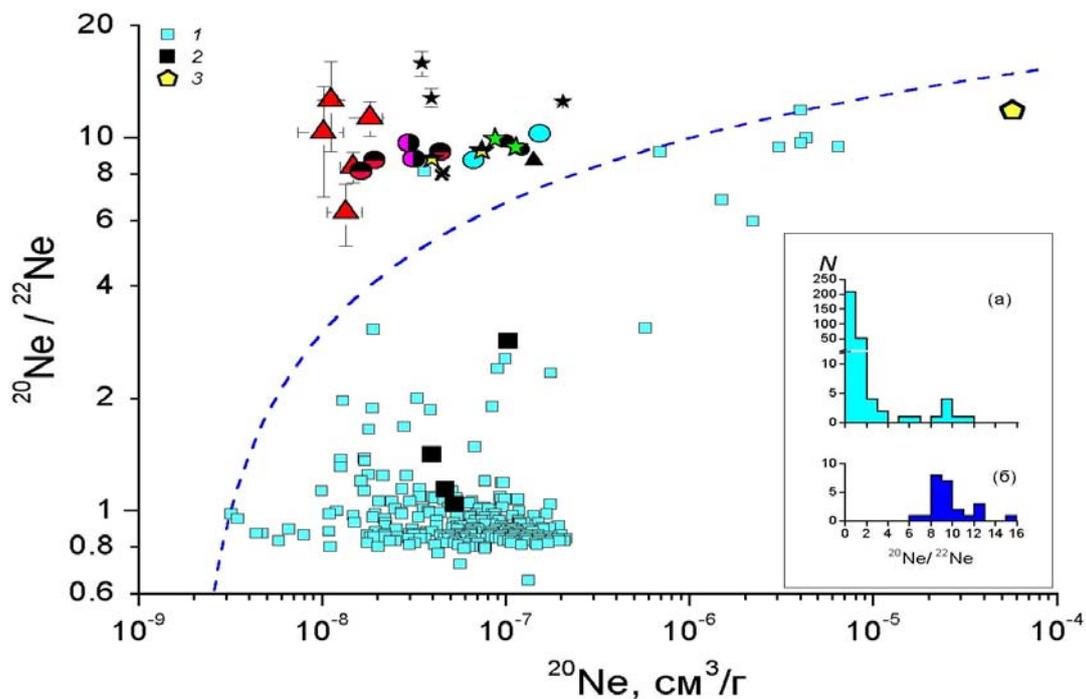


Рис. 4. Зависимость величины отношения $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ от содержания ^{20}Ne в метеоритах и хромитовых зёрнах. 1, 2 – валовые образцы и хромитовые зёрна из современных L-хондритов соответственно; 3 – взятые хромитовые зёрна. Остальные обозначения см. на рис. 1. Пунктир – условная граница раздела данных для современных и ископаемых метеоритов. Вставка: (а)

распределение величины отношения $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ в 274 современных L-хондритах и (б) 23 образцах ископаемых метеоритов.

Для последующего обсуждения отметим также тот факт, что практически все ископаемые метеориты найдены только в одном карьере Thorsberg на небольшой площади – всего $\sim 6000 \text{ м}^2$. При этом наиболее насыщенным метеоритами оказался тонкий слой ($\sim 25 \text{ см}$) самого древнего пласта Arkeologen. Плотность метеоритов в нём составила ~ 1 метеорит на 100 м^2 [Schmitz et al., 2001]. Кроме того, если предположение Heck и др. [Heck et al., 2004] о более позднем выпадении на Землю метеоритов с более высокими значениями радиационного возраста верно, то из него следует, что чем позднее выпали метеориты, тем меньшей массой и меньшей сохранностью хромитовых зёрен могут быть представлены образцы для анализа.

Приведённые выше особенности в распределениях содержаний благородных газов, значений радиационного возраста и мест находок метеоритов дали нам основание для альтернативного предположения, согласно которому найденные в Швеции ископаемые метеориты связаны с падением одного метеорита. Этот метеорит, наиболее вероятно, выпал ~ 470 млн. лет назад в виде метеоритного дождя, основная часть экземпляров которого оказалась сосредоточенной на небольшой площади в районе карьера Thorsberg. В рамках этого предположения ниже обсуждаются данные, полученные Heck и др. [Heck et al., 2004; Heck et al., 2008].

Обсуждение результатов

Очевидно, что радиационный возраст метеорита (продолжительность облучения космическими лучами перед его падением на Землю) не может зависеть от массы анализируемого образца. Как отмечалось выше, образцы с максимальной массой представлены наиболее сохранившимися хромитовыми зёрнами, т.е. зёрнами, наименее подвергшимися вторичным процессам, которые могли обусловить наблюдаемую зависимость возраста от массы образца. Именно образцам с максимальной массой свойственны наименьшие значения возраста. Для метеоритов *non-Ark*-группы для образца с максимальной массой ($4 \times 10^{-5} \text{ г}$), согласно рассчитанным параметрам линии регрессии (табл. 1), соответствует минимальное значение возраста $T_{21} = 0.21^{+0.11}_{-0.07}$ млн. лет; для метеоритов *Ark*-группы для максимальной массы $2.4 \times 10^{-5} \text{ г}$ соответствующее значение возраста равно $T_{21} = 0.06^{+0.07}_{-0.04}$ млн. лет. Нельзя исключить, однако, что и эти образцы с хорошо сохранившимися зёрнами были подвержены (в меньшей степени) вторичным процессам, завывсившим значение их возраста. Поэтому минимальное значение возраста в каждой из рассматриваемых групп надо рассматривать только как верхний предел "истинного" радиационного возраста.

В рамках гипотезы падения одного метеорита в виде метеоритного дождя приведённые выше особенности в распределениях содержания благородных газов и значений радиационного возраста могут быть объяснены следующим образом. Известно, что изотопный состав благородных газов в земных образцах может изменяться за счёт вклада компонент, образованных в ядерных реакциях под действием α -частиц и нейтронов [Шуколюков и Левский, 1972; Верховский и Шуколюков, 1976; Толстихин и др., 1977; Tolstikhin, 1978; Озима и Подосек, 1987]. Аналогичные изменения изотопного состава благородных газов могут оказаться заметными и в метеоритах, долгое время находившихся в земле. Учёт этих изменений необходим, в частности, при расчете радиационного возраста метеоритов.

Для выяснения возможной причины найденной корреляции между радиационным возрастом и массой образца рассмотрим процедуру расчёта возраста ископаемых метеоритов. Возраст рассчитывался по содержанию космогенного $^{21}\text{Ne}_{\text{косм}}$ и скорости его образования P_{21} по стандартной формуле: $T_{21} = ^{21}\text{Ne}_{\text{косм}}/P_{21}$. Содержание $^{21}\text{Ne}_{\text{косм}}$ в хромитовых зёрнах Heck и др. [Heck et al., 2004] рассчитывали из соотношения:

$$^{21}\text{Ne}_{\text{косм}} = ^{21}\text{Ne}_{\text{изм}} - ^{21}\text{Ne}_{\text{захв}} - ^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}$$

Здесь $^{21}\text{Ne}_{\text{изм}}$ – измеренное содержание ^{21}Ne ; $^{21}\text{Ne}_{\text{захв}}$ и $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}$ – захваченная и нуклеогенная компоненты, соответственно. Согласно расчетам Heck и др. [Heck et al., 2004], доля $^{21}\text{Ne}_{\text{захв}}$ в неоне исследованных образцов составила $\sim 20\text{-}50\%$ от $^{21}\text{Ne}_{\text{изм}}$.

Основной источник нуклеогенного ^{21}Ne – это ядерная реакция α -частиц (ядер ^4He) от распада U и Th с ^{18}O : $^{18}\text{O}(\alpha, n)^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}$. Heck и др. [Heck et al., 2004] для определения вклада $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}$ рассчитали, что величина отношения $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}/{}^4\text{He}_{\text{рад}}$ для хромитов при среднем содержании в них кислорода 33.6% [Schmitz et al., 2001] равна 2.8×10^{-8} . При этом принималось, что в хромитах весь ^4He радиогенный.

Принципиально важно здесь отметить, что величина отношения $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}/{}^4\text{He}_{\text{рад}}$ для мелкодисперсного вещества, в частности – зёрен хромита, может увеличиваться при уменьшении размеров зёрен. Причина такого увеличения заключается в следующем.

При распаде ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U образуются α -частицы с энергиями в интервале от 4.01 до 8.75 МэВ [Leya and Wieler, 1999]. Длина пробега α -частиц с такими энергиями в хромите составляет ~ 10 –25 мкм. В ядерной реакции $^{18}\text{O}(\alpha, n)^{21}\text{Ne}$ максимальная энергия ядра отдачи ^{21}Ne составляет ~ 0.15 МэВ, что соответствует длине пробега этого ядра в хромите ~ 0.2 мкм. При распаде U и Th в зёрнах, размер которых сопоставим с длиной пробега α -частиц, такое различие в длинах пробегов обусловит более эффективную потерю (“ускользание”, вылет за пределы зерна) α -частиц по сравнению с ядрами $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}$ и, соответственно, рост величины отношения $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}/{}^4\text{He}_{\text{рад}}$ при уменьшении размера зёрен. Нарушение целостности зерна за счёт дислокаций, трещин, каверн будет увеличивать эффективность этого процесса и, т.о., также способствовать увеличению отношения $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}/{}^4\text{He}_{\text{рад}}$.

Аналогичная картина (рост величины отношения $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}/{}^4\text{He}_{\text{рад}}$ в зерне при уменьшении его размера и ухудшении сохранности) будет наблюдаться и в случае распада U и Th вне зерна.

В этой связи, величина поправки на $^{21}\text{Ne}_{\text{нукл}}$ по содержанию $^4\text{He}_{\text{рад}}$ в работе Heck и др. [Heck et al., 2004] могла оказаться заниженной, в результате чего рассчитанные значения $^{21}\text{Ne}_{\text{косм}}$ и, соответственно, радиационный возраст оказались завышенными. Очевидно, что завышение возраста будет особенно существенным для образцов хромитовых зёрен малых размеров и/или плохой сохранности.

Наблюдаемое увеличение содержания ^{20}Ne и ^{22}Ne (а также отчасти и $^4\text{He}_{\text{рад}}$) при уменьшении массы образца может быть связано с присутствием в образце карбонатов. Карбонаты, образовавшиеся в ископаемых метеоритах в результате диагенеза, в том числе и внутри хромитовых зёрен [Bridges et al., 2007], могли частично сохраниться после химической обработки в процессе извлечения зёрен из известняка. Очевидно, что доля таких “примесных” карбонатов будет увеличиваться при увеличении дефектности зёрен, т.е. при уменьшении степени их сохранности (увеличении индекса сохранности).

Таким образом, есть основания считать, что радиационный возраст всех найденных в Швеции ископаемых метеоритов – предполагаемых фрагментов метеоритного дождя не превышает ~ 0.2 млн. лет.

Предположение, что все найденные в Швеции ископаемые метеориты могут представлять собой экземпляры одного тела, выпавшего на большой площади в виде одного обширного метеоритного дождя, подкрепляется также данными о числе найденных экземпляров и площади эллипсов рассеяния метеоритных дождей. Так, после падения хондрита Mocs (L6) было собрано около 3000 фрагментов на площади более 40 км^2 [Ferko et al., 2000]. Метеорит Pultusk (H5) выпал в виде метеоритного дождя на площади 127 км^2 , при этом число выпавших фрагментов составило ~ 180 тысяч экземпляров [Lang and Kowalski, 1971]. Около 3000 экземпляров хондрита Cold Basin (L4) было собрано на площади $\sim 225 \text{ км}^2$ [Kring et al., 2000]. Эллипс рассеяния железного метеорита Gibeon, один из самых больших в мире, занимает площадь размером $390 \times 120 \text{ км}$ [Buchwald, 1975]. Принадлежащие одному падению фрагменты CR-хондрита Acfer 059/El Djouf 001 найдены в пустыне Сахара на расстоянии более 600 км друг от друга [Bischoff and Geiger, 1995]. Большинство же ископаемых метеоритов в Швеции (более 80), как отмечено выше, найдено только в карьере Thorsberg на площади всего около 6000 м^2 . В других местах в отложениях, сформировавшихся в ордовике, найдены (до 2009 г.) только два метеорита. Один из них, Gullhogen 001, размером около 1 см в диаметре, был найден в 35 км от карьера Thorsberg [Tassinari et al., 2004]. В этом метеорите были определены содержания благородных газов [Heck et al., 2008] и они были также привлечены для обсуждения в данной статье. Этот метеорит может быть ещё одним фрагментом метеоритного дождя. Второй метеорит, Brunflo, обнаружен в центральной Швеции на расстоянии ~ 500 км от карьера Thorsberg и первоначально по содержанию TiO_2 был идентифицирован как H-хондрит [Thorslund et al., 1985]. Однако в дальнейшем по среднему размеру хондр его классифицировали как L-хондрит [Alwmark and Schmitz, 2009]. Отметим, что этот метеорит был

найден в слое, сформировавшемся на ~5 млн. лет позже времени формирования содержащих метеориты слоёв в карьере Thorsberg. Не исключено, что он может представлять собой самостоятельное падение.

Как отмечалось выше, помимо ископаемых метеоритов во многих местах центральной и южной Швеции найдены и изучены реликтовые осадочно-дисперсные внеземные хромитовые (SEC) зёрна. Найдены они были в карьерах Thorsberg, Hallekis, Gullhogen, Degerhamn, Ravanas, Garde, находящихся друг от друга на расстояниях вплоть до 700 км [Schmitz *et al.*, 2003; Schmitz and Haggstrom, 2006; Heck *et al.*, 2008; Alwmark and Schmitz, 2009]. Аналогичные зёрна найдены также в России – в устье реки Лыны, Балтийско-Ладожский клинт [Korochantsev *et al.*, 2009] и в Китае [Schmitz *et al.*, 2008; Heck *et al.*, 2009]. Высокая концентрация SEC зёрен обнаруживается в слоях, одновозрастных со слоями, в которых были найдены ископаемые метеориты в карьере Thorsberg. Столь широкая распространённость мест находок и содержание больших количеств благородных газов солнечного состава в большинстве SEC зёрен позволили сделать вывод, что эти зёрна представляют собой микрометеориты, выпавшие на всю поверхность Земли ~470 млн. лет назад после катастрофического разрушения родительского тела L-хондритов [Heck *et al.*, 2008].

Однако при такой широкой распространённости SEC зёрен находки практически всех ископаемых метеоритов Швеции на небольшой площади одного карьера дают ещё один веский аргумент в пользу того, что все эти метеориты принадлежат одному метеоритному дождю. Вероятно, что самый древний и наиболее насыщенный метеоритами слой Arkeologen в карьере Thorsberg явился основным местом захоронения. В этом слое метеориты находились в условиях изоляции, возможно обусловившей, в частности, рассмотренные выше различия в содержании ^4He в образцах с максимальной массой, выделенных из метеоритов разных групп (*Ark* и *non-Ark*). В последующие формирующиеся слои известняка метеориты, т.е. фрагменты одного метеоритного дождя, могли попадать за счёт переноса в мелководном море в результате таких процессов, как изменение уровня моря, эрозия морского дна, подводные течения, флюидизация. Возможная значимость этих процессов при перераспределении внеземного вещества на морском дне отмечена в работах Schmitz и др. [Schmitz *et al.*, 2001; Schmitz and Haggstrom, 2006].

Выводы

Выполнен анализ данных Heck и др. [Heck *et al.*, 2004; Heck *et al.*, 2008] о содержании ^4He , $^{20,21,22}\text{Ne}$ и радиационного возраста для хромитовых зёрен, выделенных из ископаемых метеоритов (L-хондритов), найденных в карьерах Thorsberg и Gullhogen на юге Швеции в морских известняках – отложениях среднего ордовика. Показано, что увеличение (на ~1-2 порядка величины) содержания благородных газов в хромитовых зёрнах и их радиационного возраста при уменьшении (на ~1 порядок величины) массы образцов может быть обусловлено увеличением доли зёрен малого размера и плохой сохранности в образцах малой массы. Выявленные закономерности, а также факт находок практически всех ископаемых метеоритов на небольшой площади (~6000 м²) могут быть объяснены в предположении падения одного метеорита, выпавшего в виде метеоритного дождя, менее чем через 0.2 млн. лет после катастрофического разрушения родительского тела L-хондритов ~470 млн. лет назад. Время этого падения соответствует времени формирования в карьере Thorsberg самого древнего пласта с фрагментами метеорита. Фрагменты метеорита в более молодых пластах оказались, вероятнее всего, в результате последующего переотложения в условиях мелководного моря в процессе формирования осадочной толщи. В рамках этого предположения нет необходимости в привлечении гипотезы интенсивного потока метеоритов на Землю в течение ~1-2 млн. лет около 470 млн. лет назад для объяснения характера распределения ископаемых метеоритов в отложениях среднего ордовика в Швеции.

Автор благодарен А.В. Фисенко за обсуждение полученных результатов и ценные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы П15 Президиума РАН.

Литература

- Верховский А.Б., Ю.А. Шуколюков (1976), Изотопный состав неона в породах земной коры и происхождение $^{21}\text{Ne}_{\text{рад}}$ в природных газах, *Геохимия*, № 5, 778-781.
- Озима М., Ф. Подосек. (1987), *Геохимия благородных газов*. (Пер. с англ.) Недра, Ленинград. (Ozima M., F. A. Podosek (1983), *Noble gas geochemistry*, Cambridge University Press. Cambridge)
- Толстихин И. Н., А. Б. Верховский, Ю. А. Шуколюков (1977), О связи между изотопным составом первичного неона и распространённостью радиогенных He, Ne и Ar в атмосфере и природных газах, *Геохимия*, № 5, 793-797.
- Шуколюков Ю. А., Л. К. Левский (1972), *Геохимия и космохимия изотопов благородных газов*, Атомиздат, Москва.
- Alexeev V. A. (2009), Ordovician fossil meteorites in Sweden: Numerous meteorite falls or single meteorite shower? *Lunar and Planet. Sci. XL*, № 1003 (CD-ROM).
- Alwmark C., B. Schmitz (2009), The origin of the Brunflo fossil meteorite and extraterrestrial chromite in mid-Ordovician limestone from the Gärde quarry (Jämtland, central Sweden), *Meteoritics Planet. Sci.*, 44, № 1, 95-106.
- Bischoff A., T. Geiger (1995), Meteorites from the Sahara: Find locations, shock classification, degree of weathering and pairing, *Meteoritics Planet. Sci.*, 30, 113-122.
- Bogard D. (1995), Impact ages of meteorites: A synthesis, *Meteoritics*, 30, 244-268.
- Bridges J.C., B. Schmitz, R. Hutchison, R. C. Greenwood, M. Tassinari, I. A. Franchi (2007), Petrographic classification of mid-Ordovician fossil meteorites from Sweden, *Meteorit. Planet. Sci.*, 42, 1781-1789.
- Buchwald V. F. (1975), *Handbook of Iron Meteorites*. Univ. Calif. Press, Los Angeles, 2, 584-593.
- Ferko T. E., L. Schultz, L. Franke, D. D. Bogard, D. H. Garrison, P. Hutchison, M. E. Lipschutz. (2000), Exposure history of the Mocs (L6) chondrite: A study of strewn field samples, *Meteorit. Planet. Sci.*, 35, 1215-1227.
- Greenwood R. C., B. Schmitz, J. C. B. Bridges, R. Hutchison, I. A. Franchi (2007), Disruption of the L-chondrite parent body: New oxygen isotope evidence from Ordovician relict chromite grains, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 262, 204-213.
- Heck Ph. R., B. Schmitz, H. Baur, A. N. Halliday, R. Wieler (2004), Fast delivery of meteorites to Earth after a major asteroid collision, *Nature*, 430, № 6997, 323-325.
- Heck Ph. R., B. Schmitz, H. Baur, R. Wieler (2008), Noble gases in fossil micrometeorites and meteorites from 470 Myr old sediments from southern Sweden, and new evidence for the L-chondrite parent body breakup event, *Meteoritics Planet. Sci.*, 43, № 3, 517-528.
- Heck Ph. R., T. Ushikubo, B. Schmitz, N. . Kita1, M. . Spicuzza1, J. (2009), Valley High-precision oxygen three-isotope SIMS analyses of Ordovician extraterrestrial chromite grains from Sweden and China: Debris of the L chondrite parent asteroid breakup, *Lunar and Planet. Sci. XL*, № 1119 (CD-ROM).
- Keil K., H. Haack, E. R. D. Scott (1994), Catastrophic fragmentation of asteroids: Evidence from meteorites, *Planet. Space Sci.*, 42, 1109-1122.
- Korochantsev A. V., C. A. Lorenz, M. A. Ivanova, A. V. Zaytsev, N. N. Kononkova, I. A. Roshchina, E. V. Korochantseva, D. A. Sadilenko, A. Ya. Skripnik (2009), Sediment-Dispersed Extraterrestrial Chromite in Ordovician Limestone from Russia, *Lunar and Planet. Sci. XL*, № 1101 (CD-ROM).
- Korochantseva E. V., M. Trieloff, C. A. Lorenz, A. I. Buykin, M. A. Ivanova, W. H. Schwarz, J. Hopp, E. K. Jessberger (2007), L-chondrite asteroid breakup tied to Ordovician meteorite shower by multiple isochron ^{40}Ar - ^{39}Ar dating, *Meteoritics Planet. Sci.*, 42, № 1, 113-130.
- Kring D. A., A. J. T. Jull, P. A. Bland (2000), The Gold Basin strewn field, Mojave Desert, and its survival from the Late Pleistocene to the present, *Workshop on Extraterrestrial Materials from Cold and Hot Deserts* / Eds. Schultz L., Franchi I., Reid A., and Zolensky M. LPI Contribution No. 997, Lunar and Planetary Institute, Houston, 44-45.
- Lang B., M. Kowalski (1971), On the possible number and mass of fragments from Pultusk meteorite shower, 1868, *Meteoritics*, 6, № 3, 149-158.
- Leya I., R. Wieler (1999), Nucleogenic production of Ne isotopes in Earth's crust and upper mantle induced by alpha particles from the decay of U and Th, *J. Geophys. Res.*, 104, № B7, 15,439-15,450.

- Meier M. M. M., B. Schmitz, P. R. Heck, H. Baur, R. Wieler (2008), Noble gases in individual sediment-dispersed chromite grains – micrometeorites from an Ordovician asteroid collision, *Lunar and Planet. Sci. XXXIX*, № 1539 (CD-ROM).
- Schmitz B., C. Alwmark, A. Cronholm, M. Tassinari (2009), The breakup of the L-chondrite parent body and its signature in Ordovician sediments - an update, *Abstracts of the 72nd Annual Meteoritical Society Meeting. LPI*, Houston, № 5153.
- Schmitz B., Th. Haggstrom (2006), Extraterrestrial chromite in Middle Ordovician marine limestone at Kinnekulle, southern Sweden – Traces of a major asteroid breakup event, *Meteoritics Planet. Sci.*, 41, № 3, 455-466.
- Schmitz B., Th. Haggstrom, M. Tassinari (2003), Sediment-dispersed extraterrestrial chromite traces a major asteroid disruption event, *Science*, 300, № 5621, 961-964.
- Schmitz B., D. A. T. Harper, B. Peucker-Ehrenbrink, S. Stouge, C. Alwmark, A. Cronholm, S. M. Bergström, M. Tassinari, W. Xiaofeng (2008), Asteroid breakup linked to the Great Ordovician Biodiversification Event, *Nature Geoscience*, 1, 49-53.
- Schmitz B., M. Lindström, F. Asaro, M. Tassinari (1996), Geochemistry of meteorite-rich marine limestone strata and fossil meteorites from the lower Ordovician at Kinnekulle, Sweden, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 145, № 1-4, 31-48.
- Schmitz B., B. Peucker-Ehrenbrink, M. Lindstrom, M. Tassinari (1997), Accretion rates of meteorites and cosmic dust in the Early Ordovician, *Science*, 278, № 5335, 88-90.
- Schmitz B., M. Tassinari, B. Peucker-Ehrenbrink (2001), A rain of ordinary chondritic meteorites in the early Ordovician, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 194, 1-15.
- Tassinari M., B. Schmitz, A. Lofgren (2004), The first fossil meteorite from the mid-Ordovician of the Gullhogen quarry, Billingen, southern Sweden, *GFF*, 126, 321–324.
- Thorslund P., F. E. Wickman, J. O. Nystrom (1985), The Ordovician chondrite from Brunflo, central Sweden, 1. General description and primary minerals, *Litos*, 17, 87-100.
- Tolstikhin I. N. (1978), A review: Some recent advances in isotope geochemistry of light rare gases // *Terrestrial Rare Gases* (Ed. Alexander E. C., Jr. and Ozima M) Center for Academic Publications Japan. Japan Scientific Societies Press, Tokyo, 33-62.

В. А. АЛЕКСЕЕВ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского (ГЕОХИ РАН), e-mail: AVAL37@chgnnet.ru