

**ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД И ОРБИТЫ МЕТЕОРИТОВ****Ивлиев А.И., Куюнко Н.С. (ГЕОХИ РАН)***cosmo@geokhi.ru*; тел.: 8(499) 1378614Ключевые слова: *термолюминесценция, метеориты, обыкновенные хондриты, орбита***Введение**

Наиболее точный метод получать параметры орбиты метеорита - это одновременное фотографирование его траектории во время падения двумя или более автоматическими фотокамерами, расположенными на большом расстоянии друг от друга. Специально для этой цели была создана сеть фотографических камер [1]. Однако, почти за 40-летний период работы, удалось сфотографировать только четыре падающих метеорита: Pribram [2], Lost City [3], Innisfree [1] и Peekskill [4]. На основе обработки данных полученных от свидетелей падения метеоритов, были оценены параметры орбит для других 40 метеоритов [5, 6], но они имеют низкую точность. Ограниченная информация может быть получена по времени падения метеорита [7]. Метеориты с перигелиями  $q \sim 1$  астрономическая единица (а.е.) обычно попадают на тыльную сторону Земли, или выпадают полудни, в то время как метеориты с перигелиями  $q < 1$  а.е. должны быть более равномерно распределены по обеим сторонам. Большая распространенность обыкновенных хондритов, падение которых наблюдается полудни относительно падений до полудня, указывает на то, что большинство этих метеоритов имело орбиты с перигелием  $\sim 1$  а.е.

**Оценка величин перигелия орбит метеоритов**

Метеориты, на стадии существования самостоятельных космических тел, сохраняют информацию, полученную при облучении космическими лучами, а также, в результате столкновений, которая, обычно, обозначается как радиационно-ударная история метеоритов. Периодические изменения перигелия хондритов в течение их истории облучения космическими лучами в течение  $\sim 10^7$  лет могут привести к диффузионной потере газов при  $q \leq 0.2$  а.е. (температура нагрева  $T \geq 400$  °C) и перенакоплению естественной термолюминесценции при  $q \sim 1$  а.е. в течение последних  $\sim 10^5$  лет перед захватом Землей.

Измерения термолюминесценции (ТЛ) - чрезвычайно полезный и чувствительный метод для изучения метаморфизма и недавней [8]. ТЛ, наведенная в лабораторных условиях, в основном, обусловлена свечением полевого шпата и отражает его ударно-тепловую историю, в то время как естественная ТЛ, накопленная в космическом пространстве, отражает их историю облучения галактическими космическими лучами и тепловой нагрев Солнцем в зависимости от близости нахождения [9, 10]. Чем ближе метеорит приближается к Солнцу (перигелий), тем больше температура его нагрева и, следовательно, тем больше иссякает накопленная ТЛ. Количество оставшейся ТЛ определяет величину эквивалентной дозы, которая легко измеряется при облучении образца метеорита в лабораторных условиях. С другой стороны, время нахождения метеорита на максимальном удалении от Солнца (афелий) и, соответственно, при минимальной температуре нагрева, отражается в результатах измерений ТЛ величиной дозы насыщения. Эта величина определяется путем многократного облучения образца в лабораторных условиях от внешнего источника различными дозами облучения.

Определение параметров орбит метеоритов возможно при соблюдении ряда условий. 1) Величина ТЛ, накопленная метеоритом в космическом пространстве, должна достигнуть стадии равновесия. Обычно эта стадия наступает при условии, что метеорит был выделен из родительского тела, и облучался космическими лучами в течение периода времени  $> 10^5$  лет. В работе [8] показано, что этому условию удовлетворяют все выпавшие метеориты. 2) Сильное соударение метеоритов в космическом пространстве приводит к уменьшению уровня накопленной ТЛ. Поэтому, для настоящего исследования, были отобраны метеориты с ударным классом S1 – S3. 3) Интенсивность ТЛ в различных подтипах неравновесных обыкновенных хондритах изменяется более чем в 1000 раз, что не позволяет проводить оценку параметров их орбит. 4) Уровень накопленной ТЛ изменяется с глубиной залегания исследуемого образца, что должно требовать внесения соответствующей корректировки результатов измерений. Однако, в работе [11] показано, что изменение интенсивности ТЛ с глубиной залегания образца не превышает 30%. Для

оценки параметров орбит метеоритов эта величина не является существенной, и ее можно не учитывать.

Методика эксперимента, применяемая в настоящих исследованиях, аналогична методике описанной в работах [12-14].

Основная доля естественной ТЛ, накопленной во время нахождения метеорита на орбите, в основном, образуется за счет облучения галактическими космическими лучами. Этот уровень ТЛ достигает "равновесия" за промежутки времени приблизительно равный  $10^5$  лет [8]. Изменения параметров орбиты метеорита должно привести к изменению уровня естественной ТЛ. После падения метеорита на Землю, за счет фактического прекращения облучения галактическими космическими лучами, уровень естественной ТЛ, накопленной в высокотемпературной области кривой свечения ( $\geq 200$  °С) остается постоянным, если его тело не подвергалось длительному нагреву до температуры близкой к  $100$  °С [11, 15, 16]. Нагрев метеорита при его прохождении через атмосферу Земли охватывает только область меньше 5 мм от его внешней поверхности. Тщательный отбор пробы, без коры плавления метеорита, позволяет исключить возможное уменьшение уровня естественной ТЛ.

В большинстве обыкновенных хондритов уровни естественной ТЛ наблюдаются в области 200-1800 Гр [17-19]. Вычисление величины естественной ТЛ в обыкновенных хондритах позволяет предложить, что интенсивность ТЛ является чувствительным индикатором степени их нагрева Солнцем, зависящим от перигелия. Хондриты, имеющие орбиты с перигелием  $q < 0.85$  а.е. должны показывать очень низкие уровни естественной ТЛ ( $< 50$  Гр для  $T \sim 250$ °С на кривой свечения), тогда как перигелии с  $q > 0.85$  а.е. должны показать широкий диапазон естественной ТЛ ( $> 50$  Гр) со значительным рассеиванием, связанным с вариациями в величине накопленной дозы, которая может зависеть от глубины залегания образца и альбедо [17]. Однако, прямое сравнение тепловой и радиационной истории метеоритов исключительно на основе естественной ТЛ, невозможно из-за значительных вариаций величины чувствительности ТЛ в различных метеоритах. Поэтому, необходимо нормализовать интенсивность естественной ТЛ в каждом образце к его чувствительности посредством измерения величины ТЛ на единицу дозы облучения от радиоактивного источника. Величина отношения, известная как эквивалентная доза, определяемая для заданной температуры на кривой свечения, вычисляется по формуле:

$$ED = D (TL_{nat}/TL_{ind}),$$

где  $TL_{nat}$  и  $TL_{ind}$  – величины естественной и наведенной ТЛ, соответственно, а  $D$  - величина дозы, наведенная в лабораторных условиях (Гр). Используя такой подход, Melcher [20] оценил перигелии 45 метеоритов. Однако, вычисления проведенные нами [21] показали, что лучше проводить вычисления  $ED$  не для заданной температуры, а для температурного интервала на кривых свечения ( $100-240$  °С) и ( $240-340$  °С). Такой подход позволяет определить величину  $ED$  с ошибкой  $\leq 15\%$  и, таким образом, более точно оценить величину перигелия.

**Таблица**

Величины эквивалентных доз (Гр) в хондритах

Метеорит	Тип	$ED_{LT}$	$ED_{HT}$
Biurboele	L/LL4	$380 \pm 50$	$1560 \pm 40$
Dalgety Downs	L4	$2.3 \pm 0.2$	$300 \pm 56$
Dhajala	H3.8	$17 \pm 01$	$210 \pm 10$
Elenovka	L5	$39 \pm 3$	$230 \pm 20$
Grady	H3.7	$14 \pm 4$	$800 \pm 110$
Khohar	L3.6	$12.1 \pm 1.6$	$513 \pm 14$
Kunashak	L6	$166 \pm 20$	$432 \pm 70$
Kunya-Urgench	L5	$112 \pm 10$	$1000 \pm 80$
Kyushu	L6	$300 \pm 56$	$1810 \pm 110$
Malakal	L6	$12 \pm 1$	$24 \pm 10$
Nikol'skoe	L4/5	$161 \pm 7$	$1590 \pm 150$
Ochansk	H4	$107 \pm 11$	$1050 \pm 100$
Pervomaisky	L6	$201 \pm 19$	$710 \pm 120$
Pribram	H5	$114 \pm 15$	$1270 \pm 120$
Pultusk	H5	$46 \pm 9$	$810 \pm 150$
Saratov	L4	$171 \pm 11$	$560 \pm 50$

Сравнительные измерения естественног ТЛ и ТЛ, наведенной  $\gamma$  - излучением, и вычисления  $ED_{LT}$  и  $ED_{HT}$  с использованием специальной программы было выполнено для 16-ти образцов хондритов (см. таблицу). Некоторые из этих хондритов были изучены в работе [20] включая и хондрит Příbram с известной орбитой. Величины ED этого метеорита соответствует перигелию с  $q=0.8$  а.е. и согласуется с результатами ED, полученными в [20-21]. Для большинства хондритов, включая Bjurböle L/LL4, Chainpur LL3.4, Dalgety Downs L4, Dhajala H3.8, Gorlovka H3.7, Grady H3.7, Elenovka L5, Khohar L3.6, Kunashak L6, Kunya-Urgench H5, Kyushu L6, Mezo Madaras L3.7, Nikol'skoe L4/5, Ochansk H4, Pervomaisky L6, Pultusk H5, Rakity L3.6, и Saratov L4, перигелий орбит находится в пределах -1.0-0.8 а.е. Меньшая величина перигелия определена только для хондрита Malakal ( $q \sim 0.5-0.6$  а.е.), что согласуется с результатами [20]. Величина  $q \sim 1$  а.е. получена для орбиты Kunya-Urgench, что согласуется с оценкой перигелия, вычисленной по радианту падения хондрита [22].

## Литература

1. Halliday I., Blackwell A.T., Griffin A.A. // J. Astron. Soc. Can. 1978. 7. P.15-39.
2. Cepřecha Z. // Bull. Astron. Czech. 1961. 12. P.21-47.
3. McCrosky R.E., et al. // J. Geophys. Res. 1971. 76. P. 4090-4108.
4. Brown P. et al. // Nature. 1994. 367. P.624-626.
5. Simonenko A.N. Orbital Elements of 45 Meteorites. Atlas // Nauka. Moscow. 1975.
6. Wetherill, G.W., Chapman C.R. Asteroids and meteorites. In Meteorites and the Early Solar System. P.35-67.
7. Wetherill G.W. // Science. 1968. 159. P.79-82.
8. Sears D.W.G. // Nucl. Tracks Radial. Meas. 1988. 14. P.5-17.
9. Aitken. M.J. Thermoluminescence Dating // Academic Press. London. 1985.
10. McKeever S.W.S. Thermoluminescence of Solids // Cambridge Univ. Press. Cambridge. England. 1985.
11. Melcher C.L. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1981. 45. P. 615-626.
12. Ивлиев и др. // Геохимия. 1995. 9. С.1367-1377.
13. Ивлиев и др. // Геохимия. 1996. 10. С.1011-1018.
14. Ivliev A.I. et al. // Geochemistry International. 2002. 40. P.739-750.
15. Sears D.W.G., Mills A.A. // Meteoritics (1974) 9, 47-67.
16. McKeever S.W.S. Earth Planet. Sci. Lett. 1980. 58. P.419-429.
17. Benoit P.H., Sears D.W.G., McKeever S.W.S. // Icarus. 1991. 94. P.311-325.
18. Benoit P.H., Sears D.W.G. // Earth Planet. Sci. Lett. 1993. 120. P.463-471.
19. Benoit P.H., Sears D.W.G. // Meteorit. Planet. Sci. 1996. 31. P.81-86.
20. Melcher, C.L. // Earth Planet. Sci. Lett. 1981. 52. P.39-54.
21. Ivliev A.I., Alexeev V.A. // Lunar and Planetary Science XXXVII. Houston. 2006. CD-ROM 1047.pdf.
22. Bronshten V.A. // Pis'ma Astron. Zh. 1999. 25. P.153-155.

---

*Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009*

*Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)*

URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2009/informbul-1\\_2009/planet-13.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-13.pdf)

*Опубликовано 1 сентября 2009 г.*

© *Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009*

*При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала,*

*ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна*