

УДК 552.63

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХОНДР МЕТЕОРИТА ОРЛОВКА (Н5) КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО ПЛАВЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ-ПРЕКУРСОРОВ

© 2022 г. К. Г. Суханова^{1,*}, член-корреспондент РАН А. Б. Кузнецов¹, С. Г. Скублов^{1,2}

Поступило 14.12.2021 г.

После доработки 13.01.2022 г.

Принято к публикации 26.01.2022 г.

Обсуждаются результаты изучения содержания редких элементов в оливине и плагиоклазе хондр равновесного обыкновенного хондрита Орловка (Н5). Оливин представлен форстеритом (Fo 79–80), а плагиоклаз – смесью олигоклаз-андезина (An 19–49, Or 2–9) и пироксена. Содержание Y, Ti, Nb и Ni в оливинах разных хондр различается в 12–20 раз, а Sr, Ba, Al и Zr – в 5–6 раз. Содержание Y, Ti, Nb и REE в плагиоклазах варьирует в 5–6 раз. Широкие вариации концентраций редких элементов в силикатных минералах порфирировых хондр в метеорите Орловка не демонстрируют признаков уравнивания в результате термального метаморфизма или вторичных процессов. Оливиновая порфирировая хондра PO-1 обогащена тугоплавкими (Zr, Hf, Nb) и редкоземельными элементами по сравнению с хондрами неравновесных обыкновенных и углистых хондритов. Полученные данные согласуются с гипотезой о происхождении хондр в результате плавления минералов-прекурсоров.

Ключевые слова: обыкновенные хондриты, метеорит Орловка, редкие элементы, хондры, оливин, плагиоклаз

DOI: 10.31857/S2686739722050164

Наибольшая часть внеземного вещества на Земле представлена обломками равновесных обыкновенных хондритов (РОХ). РОХ сложены субмиллиметровыми силикатными сферами – хондрами, образовавшимися в результате быстрого охлаждения капель расплава в газово-пылевом облаке на ранних этапах становления Солнечной системы. РОХ никогда не претерпевали процессов дифференциации и сегрегации ядромантия, что позволило им сохранить свойства первичного вещества. Однако в результате термального метаморфизма на родительских телах хондритов состав минералов РОХ поглавным элементам был частично (петрографические типы РОХ 4 и 5) или полностью (тип 6) уравновешен [10].

Содержание редких элементов в минералах хондритов способно дать новую информацию об особенностях процессов и условиях образования РОХ. Так, изучение состава редких тугоплавких элементов в оливине, пироксене и стекле хондр

неравновесных обыкновенных хондритов (НОХ) выявило различные виды кристаллизации порфирировых хондр и позволило определить их относительные скорости остывания [12–14]. Состав умеренно летучих редких элементов обычно отражает взаимодействие хондры с окружающим газом в протопланетном облаке [18, 19]. Изучение состава редких элементов в минералах матрицы позволяет выявить образование этих элементов в схожих или различных с хондрами условиях протопланетного диска [11].

В этой работе нами определено влияние термального метаморфизма на состав силикатных минералов в порфирировых хондрах равновесного обыкновенного хондрита Орловка (Н5).

Метеорит Орловка – один из крупнейших экземпляров, обнаруженных в Западной Сибири. Его вес составляет 40.5 кг, а первоначальный размер 21 × 30 × 37 см. [2]. Метеорит был найден в июле 1928 г. крестьянином Н.К. Ахметовым во время работы на своем пахотном участке около д. Орловка (ныне граница Новосибирской и Омской областей). Через два года после находки образец был доставлен в Омский краеведческий музей, где после осмотра П.Л. Драверт отнес его к классу каменных метеоритов (steinmeteorite).

Первое петрографическое описание метеорита было составлено П.Н. Чирвинским [8]. Метеорит

¹Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: cris.suhanova92@yandex.ru

сложен оливиновыми хондрами с вкрапленниками сульфидного железа и пластинками самородного железа и никеля. Во второй половине XX века отечественными специалистами были определены валовый химический состав [3] метеорита и содержание в нем инертных газов (${}^3\text{He} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г}$, ${}^{22}\text{Ne} = 1.84 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г}$, ${}^{36}\text{Ar} = 1.51 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г}$) [5]. Изотопный состав Pb в метеорите Орловка был измерен в 1964 г. и оказался близок к составу Pb в силикатной части железосиликатного метеорита Брагин, что могло быть вызвано контаминацией земным Pb при взаимодействии с почвенными водами. Вероятность такой контаминации очень высока, поскольку оба метеорита относятся к группе находок и долго лежали в грунте до момента обнаружения [6]. В 1965 г. был определен K–Ar-методом (4.2 млрд лет) и U–Th–He-методом (3.6 млрд лет) возраст метеорита Орловка, что подтвердило его древнее происхождение [1]. Вычисленный радиационный He–H- и Ne–Na-возраст показал, что хондрит был отделен от родительского тела около 4.0–5.6 млн лет назад [1, 9].

В этой работе проведено дальнейшее изучение вещества метеорита Орловка, образец которого был предоставлен Горным музеем Санкт-Петербургского горного университета. Химический состав главных элементов в минералах хондр определен методом EPMA в ИГГД РАН на микрозонде “Jeol” JXA-8230 с четырьмя волновыми дисперсионными спектрометрами (WDS). Точечные измерения состава минералов выполнялись с ускоряющим напряжением 20 кВ и током 20 нА. Диаметр сфокусированного пучка составил 3 мкм. В качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды и металлы. Для коррекции матричного эффекта использовался алгоритм ZAF. Линии K α 1 измерялись для всех элементов.

Содержание редких (TE) и редкоземельных элементов (REE) в минералах определено методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде “Cameca” IMS-4f в ЯФ ФТИАН. Перед измерениями препарат напылялся золотом. Условия съемки на ионном микрозонде “Cameca” IMS-4f: первичный пучок ионов 16O_2^+ , диаметр пучка ~20 мкм; ток ионов 5–7 нА; ускоряющее напряжение первичного пучка 15 кэВ. Погрешность измерений не превышала 10% для примесей с концентрациями >1 ppm и 20% для концентраций <1 ppm. Содержание редких элементов в порообразующих минералах определялось максимально близко к точкам анализа главных элементов методом EPMA. Спектры распределения REE минералов нормировались к хондриту CI [16].

Земное выветривание и импактный метаморфизм метеоритов влияют на мобилизацию редких элементов в силикатных минералах хондритов

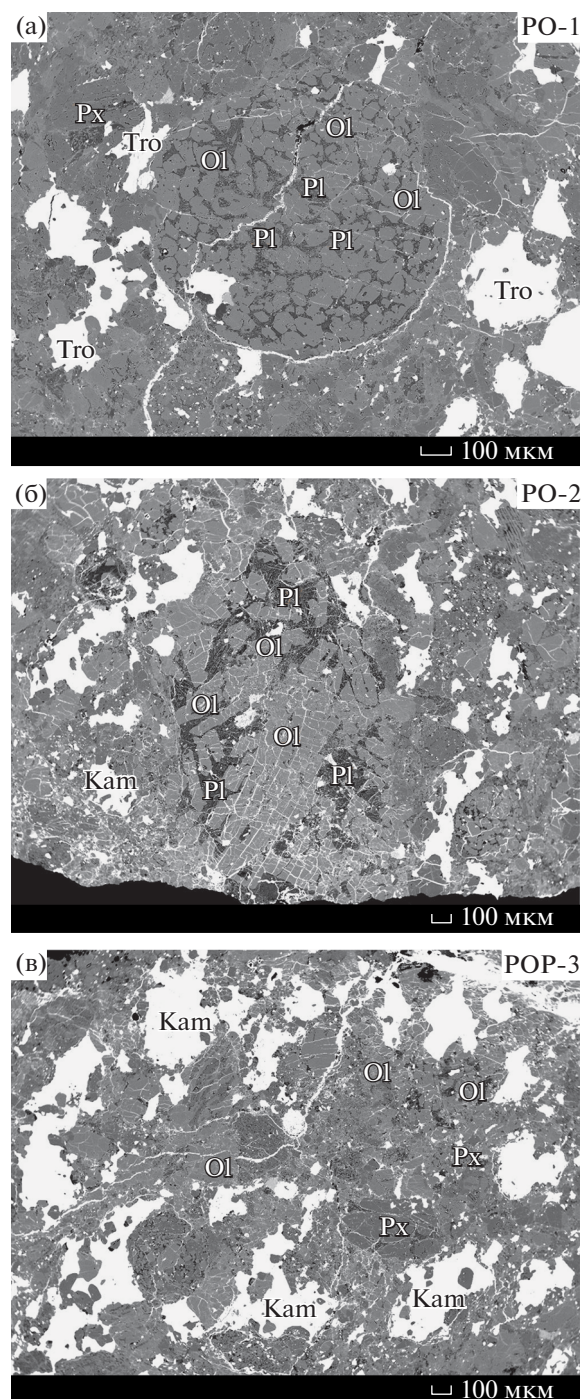


Рис. 1. Фотографии и минеральный состав хондр PO-1 (а), PO-2 (б) и POP-3 (в) метеорита Орловка в обратно-отраженных электронах. Ol – оливин, Px – пироксен, Pl – плагиоклаз, Tro – троилит, Кам – камасит.

[15, 17]. Учитывая, что метеорит Орловка относится к группе находок и неизвестно, как долго он был подвергнут земному выветриванию, на первом этапе исследования авторы определили степень выветривания и ударную стадию этого

Таблица 1. Среднее содержание главных (мас. %) и редких (ppm) элементов в минералах метеорита Орловка

Хондра	Оливин			Плагиоклаз	
	PO-1	PO-2	POP-3	PO-1	PO-2
SiO ₂	39.41	39.38	39.57	63.57	61.98
Al ₂ O ₃	0.02	b.d.l.	0.01	21.11	18.71
MgO	41.84	41.70	42.30	0.15	3.58
TiO ₂	0.05	0.02	0.01	0.06	0.04
CaO	0.02	0.02	0.02	2.95	2.50
FeO	17.92	17.49	17.81	1.40	2.49
MnO	0.45	0.46	0.45	—	—
Cr ₂ O ₃	0.03	0.02	0.02	—	—
NiO	0.02	b.d.l.	b.d.l.	—	—
Na ₂ O	—	—	—	9.27	8.81
K ₂ O	—	—	—	0.95	1.13
Сумма	99.77	99.11	100.20	99.46	99.24
Zr	0.27	1.21	0.66	31.8	18.3
Hf	0.07	0.09	0.03	1.74	0.77
Ca	4194	3811	4056	—	—
Y	0.01	0.14	0.04	6.29	1.14
Al	119	563	108	—	—
Ti	141	433	35.8	3999	732
Nb	0.08	0.25	0.02	5.64	1.17
La	0.02	0.04	0.02	0.89	0.13
Ce	0.02	0.08	0.23	1.70	0.32
Pr	0.01	0.01	0.01	0.29	0.04
Nd	b.d.l.	0.09	b.d.l.	1.94	0.26
Sm	b.d.l.	0.05	0.03	0.28	0.12
Eu	0.01	0.01	n.d.	0.69	0.36
Gd	0.03	0.04	0.01	1.17	0.13
Dy	0.01	0.05	n.d.	1.23	0.21
Er	0.02	0.04	0.02	0.83	0.17
Yb	0.02	0.05	0.03	0.26	0.22
Lu	0.01	0.01	0.01	0.12	0.03
Sr	0.12	0.89	0.18	96.5	53.9
Ba	0.14	0.98	0.66	39.0	22.5
V	22.0	23.1	17.2	81.9	89.4
Ni	24.0	481	284	—	—
Cr	828	621	377	2198	1652
Rb	0.76	1.70	0.97	16.0	14.0

Примечание. Прочерк — элемент не определялся. b.d.l. — содержание элемента ниже порога обнаружения.

метеорита по методикам [10, 20]. Метеорит Орловка отличается присутствием большого количества крупных пор и трещин, заполненных никелистым железом (тэнит-камасит), сульфидами

или их вторичными минералами. Вторичные минералы встречаются довольно редко, замещают около 20–30% минералов, что отражает малую степень выветривания метеорита, соответствующей степени W2. Большое количество трещин, заполненных рудными минералами, но отсутствие двойников оливина, позволяет оценить ударную стадию метеорита Орловка как S3.

В метеорите Орловка были изучены оливин и плагиоклаз трех крупных (от 0.5 до 1 мм) порфировых хондр PO-1, PO-2 и POP-3 (рис. 1). Хондры PO-1 и PO-2 сложены идиоморфными вкрапленниками оливина, интерстиции между которыми занимают неполностью раскристаллизованный плагиоклаз. Хондра POP-3 сложена в равной степени оливином и энстатитом, плагиоклаз практически отсутствует.

Оливин в метеорите Орловка по составу главных элементов гомогенен (табл. 1) и относится к форстериту (Fo 79–80). Оливин хондры PO-1 отличается высоким содержанием тугоплавких Ti, Y, Al и умеренно летучих Ba, Rb несовместимых элементов, по сравнению с оливином хондр PO-2 и POP-3 (табл. 1). В оливине хондр проявлена сильная прямая корреляция Nb и Zr ($r = 0.75$) (рис. 2). При этом оливин хондры PO-1 обладает наибольшим средним содержанием Nb и Zr, оливин хондры PO-2 — наименьшим, а для оливина POP-3 характерны промежуточные значения. Содержание редких элементов (TE) в оливине метеорита Орловка близко к хондритовым значениям (рис. 3а), при этом спектры распределения TE в метеорите сильно дифференцированы. На рис. 3а наблюдается явное разделение хондр по содержанию в оливине Y, Al, Nb, Sr, Ba и Ni.

Плагиоклаз в метеорите Орловка слабо раскристаллизован и чаще всего представлен смесью плагиоклаза и пироксена. В порфировых хондрах плагиоклаз характеризуется олигоклаз-андезиновым (An 19–49, Or 2–9) составом и минимальной степенью раскристаллизованности. Особенности распределения TE в хондрах метеорита Орловка сохраняются и для плагиоклаза. Плагиоклаз хондры PO-1 обогащен тугоплавкими (Nb, Y) элементами и REE относительно плагиоклаза хондры PO-2. Прямая корреляция отношения Nb/Zr, наблюдаемая в оливине обеих хондр, фиксируется только в плагиоклазе хондры PO-1 (рис. 2 б). Содержание умеренно летучих совместимых (Sr, Ba, Rb) и несовместимых (V, Cr) элементов в плагиоклазе обеих хондр находится примерно на одном уровне (рис. 3б). В целом содержание TE в плагиоклазе хондр выше, чем в хондритах. Спектр распределения TE имеет ярко выраженную положительную Eu-аномалию. Содержание HREE преобладает над LREE ($0.5 < (La/Sm)_N < 3.3$; $0.2 < (Ce/Yb)_N < 2.3$).

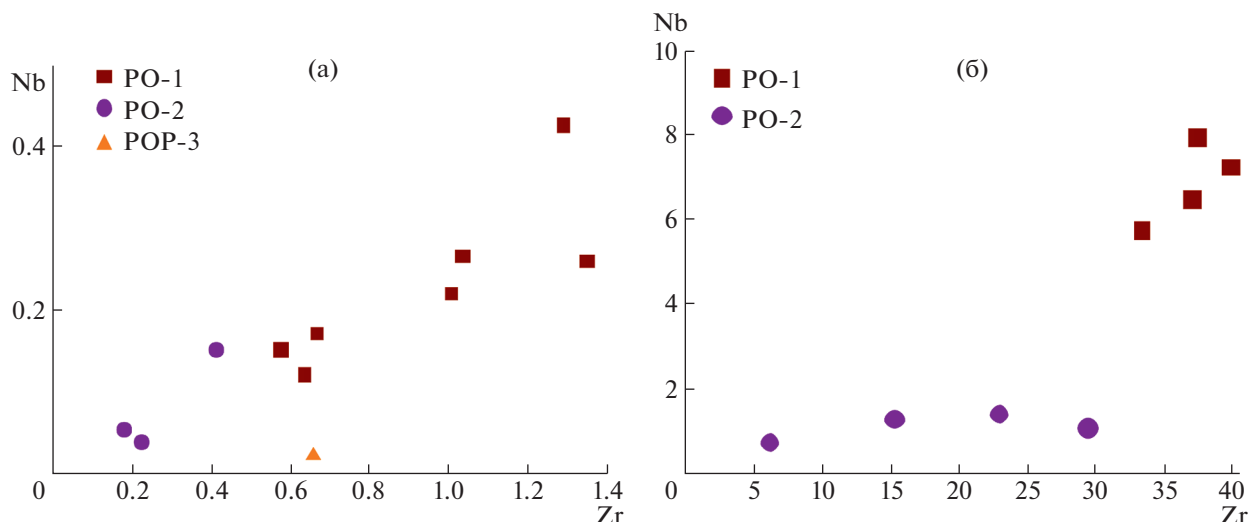


Рис. 2. Соотношение редких элементов (ppm) в оливине (а) и плагиоклазе (б) хондр PO-1, PO-2 и POP-3 метеорита Орловка.

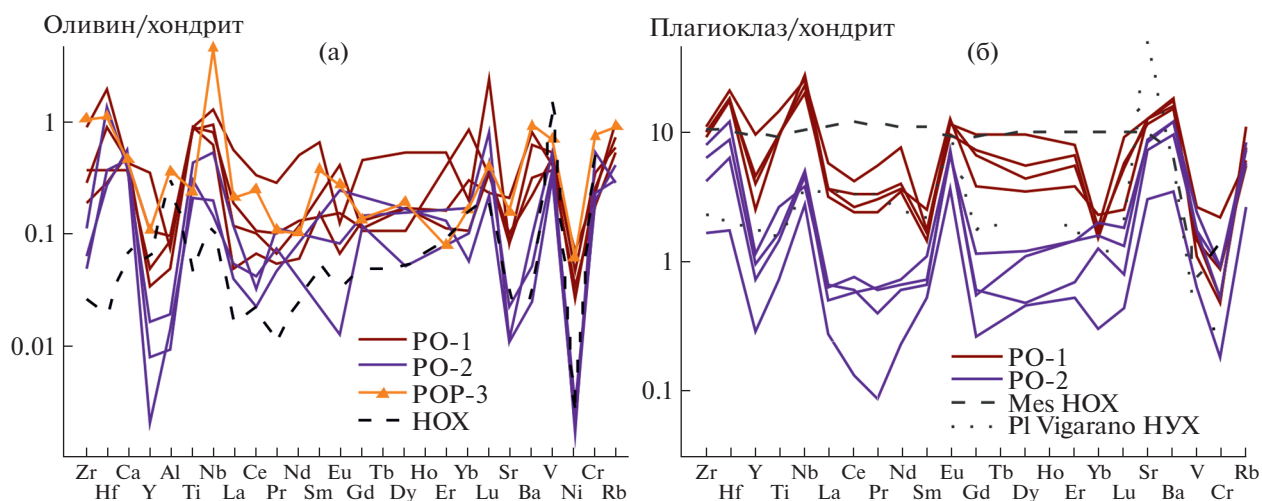


Рис. 3. Содержания редких элементов в оливине (а) и плагиоклазе (б) хондр метеорита Орловка, нормированные к CI хондриту. Данные о составе минералов HOX приведены по [12, 16].

Наблюдаемые различия в содержании ТЕ в оливине и плагиоклазе РОХ отражают сохранение индивидуальных особенностей хондр при воздействии термального метаморфизма на родительских телах хондритов. Оливин хондр PO-1 и POP-3 обогащен ТЕ относительно хондры PO-2 и минералов HOX (рис. 3а). При этом содержание ТЕ в оливине РОХ значительно варьирует и не демонстрирует признаков уравнивания. Плагиоклаз хондр отличается меньшими вариациями содержания ТЕ, тем не менее, как и оливин, сохраняет геохимические особенности хондр. Плагиоклаз хондры PO-1 обогащен ТЕ, не только относительно хондры PO-2, но и плагиоклаза неуровневого углистого хондрита (НУХ) Vigarano

(рис. 3б). Обнаруженная неуровненность содержания редких элементов в метеорите Орловка подтверждает полученные ранее геохимические данные для равновесного обыкновенного хондрита Бушхов (L6) [7].

Однако, несмотря на сохранение геохимических особенностей хондр и сильную вариативность содержания ТЕ в оливине, влияние термального метаморфизма нельзя полностью исключить. Плагиоклаз метеорита Орловка обеднен REE относительно мезостазиса (стекла) хондр HOX (рис. 3б). При образовании плагиоклаза в результате нагрева и раскристаллизации мезостазиса происходит мобилизация REE, их вынос за

пределы хондры и образование апатита и высоко-Са пироксена.

Геохимические различия порфириновых хондр метеорита Орловка предполагают неоднородность источника расплава. Образование хондр в основном рассматривается как результат плавления минеральных предшественников (precursor) хондр или прямой конденсации небулярного газа в расплав [10]. Учитываемая относительную однородность газово-пылевого облака и множественные находки реликтовых зерен оливина в порфириновых хондрах, полученные данные в большей степени поддерживают предположение о появлении хондр в результате плавления материалов-прекурсоров. Обогащение тугоплавкими (Zr, Nb) и редкоземельными элементами минералов хондры PO-1 может объясняться присутствием кальций-алюминиевых включений среди прекурсорного материала некоторых хондр [4].

Таким образом, оливин порфириновых хондр метеорита Орловка не испытал уравнивания в отношении редких элементов (TE) при термальном метаморфизме. Хондры петрологического типа POX 5 сохранили свои геохимические особенности, заключающиеся в обогащенности или обедненности TE относительно друг друга и хондр NOX. Обнаруженное геохимическое различие хондр поддерживает гипотезу о плавлении минеральных прекурсоров хондр в газово-пылевом облаке.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят С.Г. Симакина, Е.В. Потапова (ЯФ ФТИАН) и О.Л. Галанкину (ИГГД РАН) за помощь в проведении аналитических работ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках темы НИР ИГГД РАН № FMUW-2022-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.П., Задорожный И.К.* Космогенные, радиогенные и первичные инертные газы в каменных метеоритах // *Метеоритика*. 1965. № 26. С. 77–90.
2. *Драверт П.Л.* Метеорит Орловка с реки Уи (Западная Сибирь) // *Труды минералогического института*. 1931. Т. 1. С. 121–125.
3. *Дьяконова М.И.* Содержание глинозема и двуокиси титана в каменных метеоритах // *Метеоритика*. 1969. № 29. С. 101–103.
4. *Иванова М.А.* Са, Al-включения в углистых хондритах – самые древние образования Солнечной системы // *Геохимия*. 2016. № 5. С. 409–426.
5. *Левский Л.К.* Новые данные по содержанию изотопов инертных газов каменных метеоритов // *Метеоритика*. 1972. № 31. С. 149–150.
6. *Соботович Э.В., Ловцюс Г.П., Ловцюс А.В.* Новые данные о содержании и изотопном составе свинца в каменных метеоритах // *Метеоритика*. 1964. № 24. С. 29–33.
7. *Суханова К.Г., Скублов С.Г., Галанкина О.Л., Оболонская Э.В., Котова Е.Л.* Редкоэлементный состав силикатных минералов в хондрах и матрице метеорита Бушхов // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 12. С. 1176–1185.
8. *Чирвинский П.Н.* Петрографическое исследование каменного метеорита Орловка // *Метеоритика*. 1948. № 4. С. 75–82.
9. *Шуколоков Ю.А.* Изотопно-космохимические свидетельства естественного транспорта вещества между планетами земной группы (обзор литературы по проблеме) // *Геохимия*. 2003. № 11. С. 1139–1171.
10. *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis.* / *Dodd R.T., Hutchison R.* Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 506 p.
11. *Hezel D.C., Palme H.* The Chemical Relationship between Chondrules and Matrix and the Chondrule Matrix Complementarity // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 294. P. 85–93.
12. *Jacquet E., Alard O., Gounelle M.* Chondrule Trace Element Geochemistry at the Mineral Scale // *Meteoritics and Planetary Science*. 2012. V. 47. P. 1695–1714.
13. *Jacquet E., Alard O., Gounelle M.* The Formation Conditions of Enstatite Chondrites: Insights from Trace Element Geochemistry of Olivine-bearing Chondrules in Sahara 97096 (EH3) // *Meteoritics and Planetary Science*. 2015. V. 50. P. 1624–1642.
14. *Jacquet E., Alard O., Gounelle M.* Trace Element Geochemistry of Ordinary Chondrite Chondrules: The Type I/type II Chondrule Dichotomy // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2015. V. 155. P. 47–67.
15. *Kovach H.A., Jones R.H.* Feldspar in Type 4–6 Ordinary Chondrites: Metamorphic Processing on the H and LL Chondrite Parent Bodies // *Meteoritics and Planetary Science*. 2010. V. 45. P. 246–264.
16. *Palme H., Lodders K., Jones A.* Solar System Abundances of the Elements. Planets, Asteroids, Comets and The Solar System. Volume 2 of Treatise on Geochemistry (Second Edition). Edited by A.M. Davis. Elsevier, 2014. P. 15–36.
17. *Pourkhorsandi H., D’Orazio M., Rochette P., Valenzuela M., Gattacceca J., Mirnejad H., Sutter B., Hutzler A., Aboulahris M.* Modification of REE Distribution of Ordinary Chondrites from Atacama (Chile) and Lut (Iran) Hot Deserts: Insights into the Chemical Weathering of Meteorites // *Meteoritics and Planetary Science*. 2017. V. 52. P. 1843–1858.
18. *Varela M.E., Sylvester P., Brandstätter F., Engler A.* Nonporphyritic Chondrules and Chondrule Fragments in Enstatite Chondrites: Insights into Their Origin and Secondary Processing // *Meteoritics and Planetary Science*. 2015. V. 50. P. 1338–1361.
19. *Varela M.E., Sylvester P., Engler A., Kurat G.* Nonporphyritic Chondrules from Equilibrated Rumuruti and Ordinary Chondrites: Chemical Evidence of Secondary Processing // *Meteoritics and Planetary Science*. 2012. V. 47. P. 1537–1557.
20. *Wlotzka F.* A Weathering Scale for the Ordinary Chondrites // *Meteoritics*. 1993. V. 28. P. 460.

GEOCHEMICAL FEATURES OF CHONDRULES FROM ORLOVKA METEORITE (H5) AS AN EVIDENCE OF PRECURSORS MELTING**K. G. Sukhanova^{a,#}, Corresponding Member of the RAS A. B. Kuznetsov^a, and S. G. Skublov^{a,b}**^a*Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation*^b*Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation*[#]*E-mail: cris.suhanova92@yandex.ru*

The results of SIMS and EPMA studies of the trace element contents of olivine and plagioclase of porphyritic chondrules from equilibrated ordinary chondrite Orlovka are reported. Olivine is of forsterite type (Fo 79–80) and plagioclase is a mixture of oligoclase-andesine (An 19–49, Or 2–9) and pyroxene. Content of Y, Ti, Nb, and Ni in olivine from different chondrules differs by 12–20 times and Sr, Ba, Al, and Zr – by 5–6 times. Y, Ti, Nb и REE content in plagioclase varies by 5–6 times. These broad variations of trace element concentrations in silicate minerals from porphyritic chondrules in Orlovka meteorite do not show signs of equilibration as a result of thermal metamorphism or other secondary processes. Porphyritic olivine chondrule PO-1 enriched in refractory (Zr, Hf, Nb) and rare-earth elements in comparison with chondrules of chondrules from unequilibrated ordinary and carbonaceous chondrites. Obtained data agree with the precursor melting hypothesis as a main chondrule-forming process.

Keywords: ordinary chondrites, Orlovka meteorite, trace elements, chondrules, olivine, plagioclase