

УДК 523.681

## МЕТЕОРИТ ОХАНСК: ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И ГЕНЕЗИСА

*А.И. Бахтин, Г.В. Сонин, Р.Х. Сунгатуллин, Р.Д. Петрова*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

### Аннотация

Методами кристаллооптики, рентгенофлуоресцентным, рентгенофазовым и электронного микронзонда исследовано вещество метеорита Оханск. Показано, что метеорит является обыкновенным оливин-бронзитовым хондритом. Его главные силикатные минералы представлены оливином, бронзитом, плагиоклазом, диопсидом, а главные рудные минералы – камаситом, троилитом. Метеорит содержит довольно много силикатного стекла. Анализ особенностей состава и строения метеорита Оханск позволил сделать вывод о том, что он образовался на ранней стадии аккреции расплавленного вещества Протосолнечной туманности и не претерпел эндогенных термобарических преобразований. По-видимому, его вещество не погружалось глубоко в недра материнского тела, поэтому оно сохраняет информацию о ранних стадиях аккреции протопланетного газопылевого вещества.

**Ключевые слова:** метеорит Оханск, хондриты, протосолнечная туманность, генезис

### Введение

Оханский метеорит упал 18 августа 1887 г. около с. Таборы в 15 км от г. Оханск Пермской губернии и весил 186.5 кг (по данным П.И. Кротова [1], общий вес собранных остатков превышал 245 кг). Наиболее детальное исследование Оханского метеорита было выполнено А.А. Маракушевым с сотрудниками [2]. Метеорит был отнесен к группе оливин-бронзитовых Н-хондритов семейства обыкновенных хондритов класса каменных метеоритов. Он интенсивно брекчирован и представлен беспорядочной смесью силикатных хондр, их обломков и вмещающей их мелкозернистой матрицей, сложенной теми же, что и хондры силикатными минералами, интерстиционным силикатным стеклом. Рудные минералы представлены никелистым железом (камаситом) и троилитом. А.А. Маракушев связывает образование Оханского метеорита с вулканическими процессами в материнском протопланетном теле. Однако большинство исследователей связывает происхождение хондритов с аккреционными процессами вещества Протосолнечной туманности. Поэтому нами предпринято дополнительное исследование Оханского метеорита с целью уточнения его генезиса.

Вопросы генезиса метеоритов являются очень важными. Именно они обуславливают интерес к исследованию метеоритного вещества, так как, во-первых, позволяют получить научную информацию о веществе Протосолнечной туманности, из которого они образовались в результате его аккреции на ранних стадиях

ее эволюции, инициированной взрывом сверхновой звезды в окрестности этой туманности [3]. Во-вторых, метеориты несут информацию и о дальнейшей эволюции вещества в недрах материнских планет, что позволяет прояснить вопросы генезиса горных пород, слагающих планеты. Характер указанной эволюции, в свою очередь, позволяет получить информацию о закономерностях эволюции планет. В этом плане исследование Оханского метеорита представляет особый интерес вследствие того, что его вещество не подвергалось воздействию эндогенных термо-барических преобразований, так как не погружалось глубоко в недра какого-то тела, и поэтому могло сохранить информацию о состоянии и составе первичного газо-пылевого вещества Протосолнечной туманности и самых ранних стадиях аккреции протопланетных тел. По своему абсолютному возрасту, около 4.7 млрд лет [4], метеорит Оханск – один из самых древних (основная масса его хранится в Геологическом музее Казанского университета с 1887 г.), что также может свидетельствовать в пользу важности предпринятых исследований его вещества.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В исследовании Оханского метеорита нами использовались следующие методы и приборы, имеющиеся в лабораториях КФУ: 1) микронзондовый анализ на сканирующем растровом электронном микроскопе XL-30 фирмы Philips (Голландия), снабженном энергодисперсионной приставкой EDAX; 2) рентгенофлуоресцентный анализ на анализаторе фирмы Bruker S8 Tiger (Германия); 3) рентгенофазовый анализ на дифрактометре P2 Phaser фирмы Bruker (Германия); 4) кристаллооптическое изучение петрографических шлифов на микроскопах ПОЛАМ РР-1 фирмы ЛОМО (Россия) и фирмы Zeiss (Германия).

Результат рентгенофлуоресцентного анализа Оханского метеорита представлен в табл. 1, где для сравнения приводятся составы близких к нему хондритов групп H и L из работы [5]. Эти данные показывают, что по содержанию главных элементов (Si, Mg, Ca, Al, Na, K) состав метеорита Оханск близок к группе H-хондритов, а по содержанию общего железа он ближе к группе L-хондритов. С использованием данных об элементном составе метеорита Оханск (табл. 1) был вычислен его средний минеральный состав (табл. 2). Последний показывает, что состав Оханского метеорита очень близок к среднему минеральному составу метеоритов класса хондритов.

Исследования под микроскопом петрографических шлифов показывают (рис. 1–8), что в строении метеорита Оханск участвуют силикатные хондры и вмещающая их матрица. Размеры хондр в поперечнике варьируют в пределах 0.1–2 мм, чаще всего встречаются хондры размером 0.2–0.9 мм. Главными минералами хондр являются оливин, бронзит, плагиоклаз, диопсид. Нередко в хондрах присутствует силикатное стекло (рис. 2), которое иногда является главным компонентом хондр (рис. 8). Хондры различаются лишь количественными соотношениями слагающих их минералов. По этому признаку выделяются следующие типы хондр в порядке уменьшения их встречаемости: 1 – оливин-бронзитовые; 2 – бронзит-оливиновые; 3 – оливин-плагиоклазовые; 4 – бронзит-плагиоклазовые; 5 – стекловатые, сложенные металлизированным плагиоклазовым стеклом с очень мелкими кристаллитами пироксена (рис. 8). По структуре преобладают зернистые

Табл. 1

Элементный состав метеорита Оханск и близких к нему групп H- и L-хондритовых метеоритов, ат. % [5]

| Элемент | H     | Оханск | L     |
|---------|-------|--------|-------|
| Fe      | 26.32 | 21.15  | 21.85 |
| Si      | 33.17 | 33.69  | 36.78 |
| Mg      | 31.72 | 30.28  | 33.92 |
| Ca      | 2.34  | 2.72   | 1.57  |
| Al      | 2.04  | 3.39   | 2.01  |
| Na      | 1.37  | 2.18   | 1.30  |
| P       | 0.23  | 0.94   | 0.25  |
| Mn      | 0.25  | 0.43   | 0.26  |
| Ni      | 1.74  | 0.37   | 1.27  |
| K       | 0.23  | 0.21   | 0.17  |
| Ti      | 0.10  | 0.08   | 0.09  |
| Co      | 0.12  | –      | 0.04  |
| Cr      |       | 0.68   |       |
| S       |       | 3.81   |       |
| Cl      |       | 0.03   |       |
| Zn      |       | 0.01   |       |
| Ag      |       | 0.01   |       |
| Cu      |       | 0.01   |       |
| Всего   | 99.65 | 99.99  | 99.51 |

Табл. 2

Средний минеральный состав метеорита Оханск (вес. %), вычисленный по его элементному составу (из табл. 1) и его сравнение со средним составом метеоритов класса хондритов [5]

| Минерал       | Оханск | Хондриты |
|---------------|--------|----------|
| Оливин        | 37.0   | 42.31    |
| Ортопироксен  | 21.0   | 28.91    |
| Клинопироксен | 6.0    |          |
| Анортит       | 2.7    | 3.34     |
| Альбит        | 11.0   | 7.37     |
| Ортоклаз      | 1.0    | 1.11     |
| Троилит       | 6.0    | 5.01     |
| Хромит        | 1.5    | 0.70     |
| Апатит        | 0.22   | 0.67     |
| Камасит       | 11.0   | 10.58    |
| Витлокит      | 2.5    | –        |
| Ильменит      | 0.1    | –        |
| Всего         | 100.02 | 100.00   |

хондры. Реже встречаются лучистые хондры (рис. 7), сложенные лучистым агрегатом пироксена (бронзита) и силикатным стеклом (между лучами). Отмечаются также оливин-пироксеновые хондры колосниковой и симплектитовой структуры, описанные в работе [2]. Цементация внутри хондр осуществляется за счет кристаллизационных контактов между зернами минералов, а также силикатным стеклом.

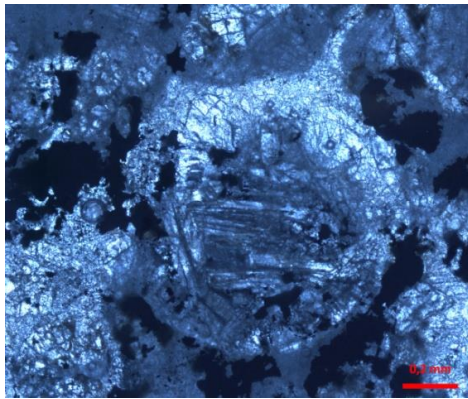


Рис. 1. Хондра ортопироксен – оливиновая. ОРх – в центре, ОI – в периферии. Черное – рудные минералы

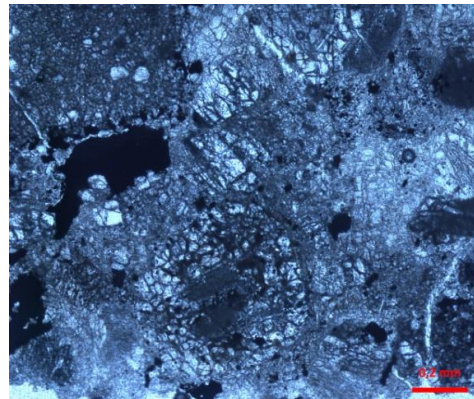


Рис. 2. Силикатное темно-серое стекло в центре оливиновой хондры

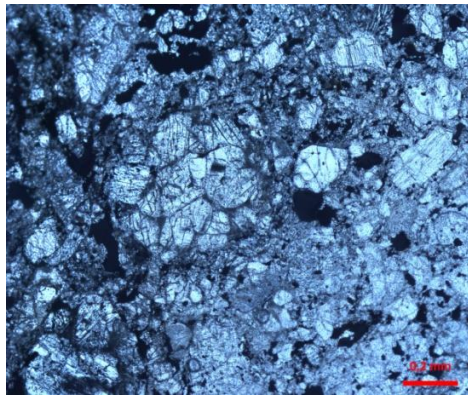


Рис. 3а. Оливин-ортопироксеновая хондра в оливин-ортопироксен-плаггиоклазовой хондре (хондра в хондре). При одном николе

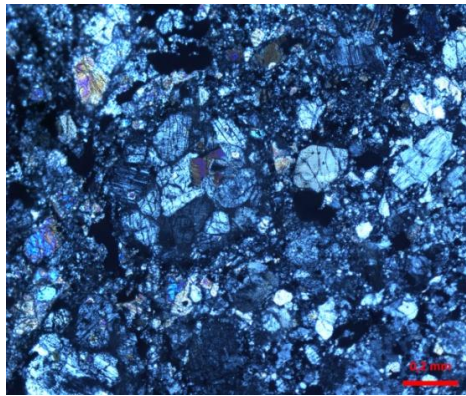


Рис. 3б. То же в скрещенных николях

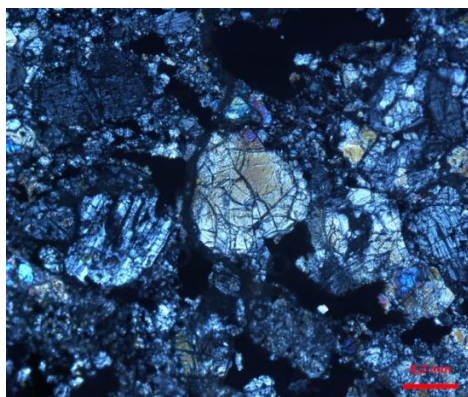


Рис. 4. Оливиновая хондра (в центре). Слева плаггиоклазовая хондра с включениями оливина. Николи +

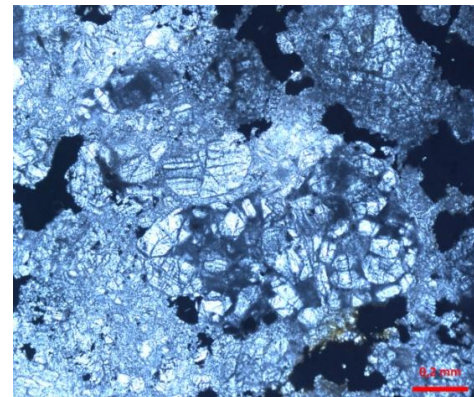


Рис. 5. Срастание двух зернистых оливиновых хондр. Сверху слева примыкает ортопироксеновая хондра. Черное – рудные минералы



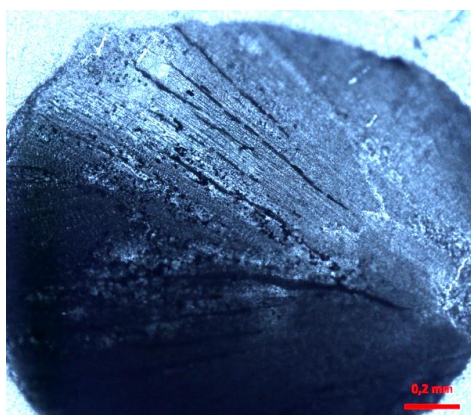


Рис. 6. Хондра лучистая ортопироксеновая. При одном никеле

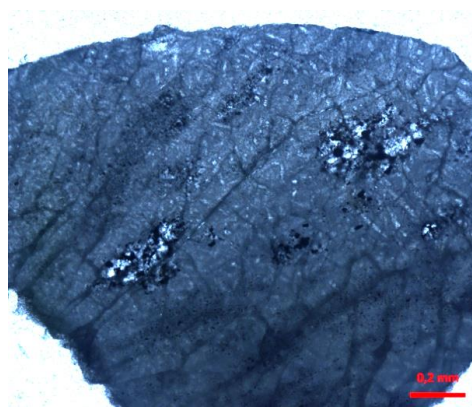


Рис. 7. Хондра, сложенная силикатным стеклом с микролитами пироксена и остаточными гнездами мелкозернистого альбита. При одном никеле

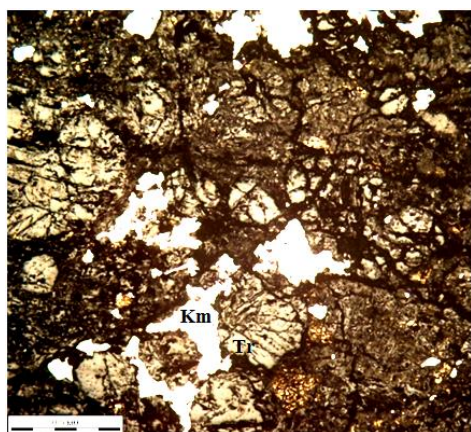


Рис. 8. Выделения камасита Km (белое) и троилита Tr (бледно-желтое) в матрице

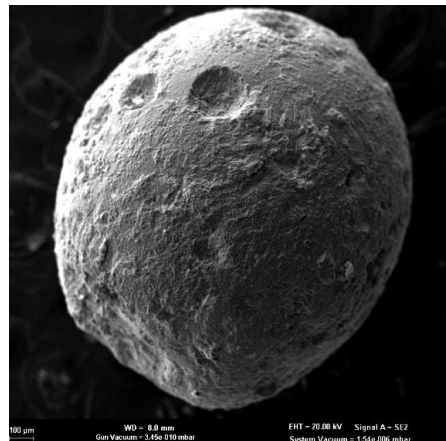


Рис. 9. Оливин-пироксен-плагиоклазовая хондра (анализ 7.1 в табл. 4, 5)

Матрица сложена мелкими зернами тех же силикатных минералов, что и хондры, а также обломками хондр, их минералов и силикатным стеклом. Наблюдаемая под микроскопом в петрографических шлифах структура матрицы напоминает разнозернистый полиминеральный песчаник (рис. 5, 9) с поровым цементом, который развивается пятнами и представлен рудными минералами (камаситом, троилитом и силикатным стеклом). Последние в метеорите концентрируются в основном в матрице и на ее границах с хондрами. Материал матрицы не проявляет следов перекристаллизации и обладает повышенной пористостью. Это подтверждается и пониженным удельным весом метеорита  $2.86 \text{ г/см}^3$ , вычисленным нами по методу Архимеда. Расчетная же теоретическая плотность метеорита, вычисленная по плотности слагающих его минералов (табл. 2), оказалась существенно выше и составила  $3.89 \text{ г/см}^3$  (табл. 3). Отсюда расчетная пористость Оханского метеорита оказалась равной 26%, которая по своей величине хорошо согласуется со слабо сцементированными обломочными породами [6]. Все это свидетельствует о том, что вещество метеорита Оханск не погружалось

Табл. 3

Расчет теоретической плотности Оханского метеорита по его минеральному составу (из табл. 2) и их плотности [7]

| Минерал       | Вес. % | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Парциальная плотность,<br>г/см <sup>3</sup> |
|---------------|--------|---------------------------------|---|
| Оливин        | 37.0   | 3.43                            | 1.2691                                      |
| Ортопироксен  | 21.0   | 3.34                            | 0.7014                                      |
| Клинопироксен | 6.0    | 3.26                            | 0.1956                                      |
| Анортит       | 2.7    | 2.76                            | 0.0745                                      |
| Альбит        | 11.0   | 2.61                            | 0.2871                                      |
| Ортоклаз      | 1.0    | 2.59                            | 0.0259                                      |
| Троилит       | 6.0    | 4.84                            | 0.2904                                      |
| Хромит        | 1.5    | 5.09                            | 0.0763                                      |
| Апатит        | 0.22   | 3.2                             | 0.0070                                      |
| Камасит       | 11.0   | 8.00                            | 0.8800                                      |
| Витлокит      | 2.5    | 3.12                            | 0.0780                                      |
| Ильменит      | 0.1    | 4.7                             | 0.0047                                      |
| Всего         | 100.02 |                                 | 3.8900                                      |

глубоко в недра материнского тела и не подвергалось воздействию повышенных температур и давлений. Отмечающиеся иногда небольшие микротрещинки, заполненные силикатным стеклом, видимо, имеют ударное происхождение и обусловлены падением хондр и их аккреционных агрегатов на поверхность материнского тела.

Под микроскопом в отраженном свете (рис. 8) видно, что рудные минералы в метеорите представлены в основном камаситом, реже троилитом, причем в хондрах их гораздо меньше, чем в матрице. В хондрах рудные минералы образуют очень мелкие, чаще точечные выделения, причем к периферии хондр их количество несколько возрастает и они увеличиваются в размерах. По-видимому, это является следствием несмесимости рудных и силикатных расплавов [2], и первые, стремясь обособиться, мигрируют в краевые участки хондровых расплавов, укрупняются и даже образуют овальные выделения на поверхности хондр (анализ 9.3 в табл. 5). В хондрах троилит резко преобладает над камаситом. В матрице, наоборот, камасит существенно преобладает над троилитом. Рудные минералы в матрице образуют более крупные, чем в хондрах, выделения неправильной формы, цементируя зерна матрицы друг с другом и матрицу с хондрами. Неправильная форма рудных выделений и нахождение их в межзерновых порах матрицы свидетельствуют о том, что рудное вещество поступало в консолидированную матрицу, когда оно находилось в еще жидком состоянии. Это говорит о высокой температуре аккреции, превышающей 1500 °С.

С целью более детального изучения состава нами было выполнено 27 микронзондовых анализов различных фрагментов Оханского метеорита. Их результаты представлены в табл. 4. Основываясь на этих результатах, был вычислен минеральный состав изученных фрагментов метеорита, который представлен в табл. 5 и 6. Анализ показывает, что главными темноцветными минералами Оханского метеорита являются оливин и бронзит (табл. 2, 5). И в хондрах, и в матрице доминирует оливин над бронзитом, причем в хондрах это более

Табл. 4  
Химический состав фрагментов метеорита Оханск (вес. %) по результатам микрозондового анализа

| № анализа | Фрагмент                 | Элементы |       |      |      |       |      |      |      |       |       |       |       |      | Прочие    |
|-----------|--------------------------|----------|-------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|
|           |                          | O        | Si    | Al   | Cr   | Mg    | Ca   | Na   | K    | Mn    | Fe    | Ni    | S     | P    |           |
| 1.1       | Зерно ОРх                | 38.43    | 16.87 | 1.03 |      | 10.58 | 1.04 | 0.68 |      | 1.06  | 28.01 |       | 1.20  |      | Mo – 1.10 |
| 1.2       | Матрица                  | 45.35    | 22.05 | 4.15 |      | 10.10 | 2.75 | 2.78 | 0.21 | 0.25  | 8.80  |       | 2.80  | 0.77 |           |
| 1.3       | Матрица                  | 43.15    | 14.99 | 1.72 |      | 14.63 | 4.47 | 1.51 |      | 11.69 |       |       | 3.76  | 2.00 | Mo – 2.10 |
| 2.1       | Зерно OI                 | 35.22    | 12.04 | 1.09 | 0.34 | 13.60 | 0.99 | 0.98 |      | 1.20  | 32.44 |       |       |      | Mo – 2.08 |
| 2.2       | Зерно OI                 | 40.05    | 16.25 |      |      | 24.26 |      |      |      | 0.44  | 19.01 |       |       |      |           |
| 2.3       | Матрица                  | 40.41    | 14.57 | 3.32 |      | 5.78  | 1.75 | 2.21 |      | 24.30 |       |       | 5.34  |      |           |
| 3.1       | Матрица                  | 42.47    | 22.47 | 2.60 |      | 11.67 | 1.61 | 1.65 | 0.35 | 14.07 |       |       |       |      | Mo – 3.12 |
| 4.1       | Хондра                   | 41.55    | 19.21 | 0.81 | 1.13 | 19.70 | 1.74 |      |      | 0.54  | 13.84 | 0.40  |       |      | Mo – 1.08 |
| 5.1       | Участок хондры           | 47.51    | 17.96 | 0.43 | 0.14 | 23.05 | 0.18 | 0.37 |      | 0.25  | 10.11 |       |       |      |           |
| 5.2       | Участок хондры           | 48.33    | 20.89 | 4.61 | 0.53 | 14.39 | 0.84 | 2.71 | 0.13 | 0.23  | 7.02  |       |       |      | Ti – 0.30 |
| 5.3       | Участок хондры           | 51.77    | 23.37 | 6.99 |      | 6.04  | 1.01 | 5.38 | 0.34 | 2.89  |       |       |       |      | Ti – 2.21 |
| 6.1       | Участок хондры           | 48.84    | 22.13 | 4.71 |      | 13.79 | 0.76 | 3.36 | 0.22 | 0.19  | 5.94  |       | 0.07  |      |           |
| 6.2       | Участок хондры           | 42.74    | 22.27 | 3.23 | 0.13 | 17.48 | 0.69 | 1.98 | 0.25 | 0.31  | 10.73 |       | 0.09  |      | Ti – 0.11 |
| 7.1       | Участок хондры           | 45.78    | 19.76 | 1.24 | 0.42 | 15.85 | 0.76 | 0.88 |      | 0.34  | 11.55 |       | 3.41  |      |           |
| 7.2       | Участок хондры           | 34.79    | 15.02 | 1.37 |      | 13.74 | 2.00 | 1.11 |      | 0.38  | 22.15 |       | 9.27  | 0.19 |           |
| 8.1       | Участок хондры           | 47.19    | 21.62 | 1.80 | 0.42 | 17.33 | 1.92 | 1.24 | 0.13 | 0.28  | 8.00  |       | 0.08  |      |           |
| 9.1       | Участок хондры           | 51.71    | 23.27 | 4.16 | 0.28 | 6.32  | 6.53 | 2.85 | 1.19 |       | 2.88  |       | 0.52  | 0.20 | Cl – 0.09 |
| 9.2       | Участок хондры           | 49.09    | 17.04 | 0.79 | 0.17 | 21.87 | 0.37 | 0.71 | 0.16 | 0.23  | 8.99  |       | 0.21  | 0.20 | Cl – 0.15 |
| 9.3       | Рудная частица на хондре | 2.17     | 0.21  |      |      | 0.21  |      |      |      |       | 59.21 | 12.09 | 26.11 |      |           |
| 9.4       | Матрица возле хондры     | 47.54    | 22.52 | 0.30 | 0.88 | 17.27 | 0.46 | 0.28 |      | 0.39  | 9.96  |       | 0.21  |      | Ti – 0.19 |
| 9.5       |                          | 46.5     | 22.07 | 0.36 |      | 18.50 | 0.33 | 0.24 |      | 0.40  | 11.45 |       | 0.15  |      |           |
| 10.1      | Участок хондры           | 42.09    | 19.80 | 2.88 | 0.58 | 12.30 | 1.60 | 1.90 | 0.42 | 0.26  | 15.59 | 0.61  | 1.75  | 0.23 |           |
| 10.2      | Участок хондры           | 50.24    | 23.34 | 5.19 | 0.19 | 11.80 | 0.69 | 3.70 | 0.26 | 0.20  | 5.19  |       |       |      |           |
| 11.1      | Участок хондры           | 44.7     | 23.27 | 2.41 | 0.35 | 12.03 | 2.58 | 1.67 | 0.39 | 0.31  | 9.60  | 0.40  | 2.29  |      |           |
| 11.2      | Матрица возле хондры     | 28.73    | 20.43 | 0.42 |      | 24.25 |      | 0.30 |      | 0.72  | 24.07 |       | 1.07  |      |           |
| 11.3      | Матрица возле хондры     | 16.28    | 21.78 | 0.73 |      | 20.91 |      | 0.47 |      | 1.08  | 38.54 |       | 0.32  |      |           |
| 12.1      | Участок хондры           | 45.44    | 18.81 | 1.59 | 0.50 | 19.90 | 0.77 | 1.11 |      | 0.30  | 11.21 |       | 0.16  | 0.21 |           |

Табл. 5  
 Минимальный состав фрагментов метеорита Оханск (вес. %), рассчитанный по данным табл. 4

| № анализа | Фрагмент            | OI             | OPx            | CPx            | Ap              | Ab   | Ort | (Fe,Ni) | Троилит | Хромит | Стекло | Прочие                            |
|-----------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------|-----|---------|---------|--------|--------|-----------------------------------|
| 1.1       | Зерно OPx в матрице | 8.7<br>(0.18)  | 4.1<br>(0.18)  | 6.8<br>(0.18)  | 1.2<br>(N=13)   | 7.8  |     |         | 3.3     |        | 37.9   | Повелит – 2.3                     |
| 1.2       | Матрица             | 17.7<br>(0.15) | 15.5<br>(0.15) | 6.4<br>(0.12)  | 4.0<br>(N = 11) | 33.3 | 1.6 |         | 7.6     |        |        | Витлокиит – 3.9                   |
| 1.3       | Матрица             | 55.4<br>(0.19) |                | 6.4            | –<br>(N = 0)    | 17.7 |     |         | 6.8     |        |        | Витлокиит – 10.1<br>Повелит – 3.6 |
| 2.1       | Зерно OI в матрице  | 52.0<br>(0.18) |                |                |                 |      |     |         |         | 0.7    | 43.0   | Повелит – 4.3                     |
| 2.2       | Зерно OI в матрице  | 91.0<br>(0.18) |                |                |                 |      |     |         |         |        | 9.0    |                                   |
| 2.3       | Матрица             | 20.4<br>(0.18) | 3.6<br>(0.18)  | 7.8<br>(0.12)  | 4.4<br>(N = 13) | 29.6 |     | 17.0    | 17.2    |        |        |                                   |
| 3.1       | Матрица             | 6.5<br>(0.18)  | 53.0<br>(0.18) |                | 2.3<br>(N = 10) | 21.0 | 2.5 | 10.3    |         |        |        | Повелит – 4.4                     |
| 4.1       | Хондра              | 50.0<br>(0.18) | 30.0<br>(0.18) | 9.2<br>(0.12)  |                 |      |     |         |         | 2.5    |        | Повелит – 2.3<br>Шпинель – 2.0    |
| 5.1       | Участок хондры      | 89.7<br>(0.16) | 3.2<br>(0.16)  | 2.2<br>(0.12)  | –<br>(N = 0)    | 4.6  |     |         |         | 0.3    |        |                                   |
| 5.2       | Участок хондры      | 57.5<br>(0.18) |                |                | 7.0<br>(N = 17) | 33.0 | 1.0 |         |         | 1.0    |        | Ильменит – 0.5                    |
| 5.3       | Участок хондры      | 24.5<br>(0.17) |                |                | 2.5<br>(N = 4)  | 66.5 | 2.5 |         |         |        |        | Ильменит – 4.0                    |
| 6.1       | Участок хондры      | 53.0<br>(0.16) |                |                | 5.2<br>(N = 12) | 40.0 | 1.6 |         | 0.2     |        |        |                                   |
| 6.2       | Участок хондры      | 65.0<br>(0.20) | 5.5<br>(0.20)  |                | 4.7<br>(N = 17) | 22.3 | 1.7 |         | 0.2     | 0.3    |        | Ильменит – 0.3                    |
| 7.1       | Участок хондры      | 33.0<br>(0.13) | 39.3<br>(0.13) |                | 5.7<br>(N = 34) | 11.0 |     |         | 10.0    | 1.0    |        |                                   |
| 7.2       | Участок хондры      | 48.5<br>(0.17) |                | 11.0<br>(0.10) | 0.4<br>(N = 3)  | 13.1 |     |         | 26.0    |        |        | Витлокиит – 1.0                   |
| 8.1       | Участок хондры      | 32.0<br>(0.17) | 40.0<br>(0.16) | 10.5<br>(0.40) | 1.4<br>(N = 9)  | 14.1 | 0.9 |         | 0.2     | 0.9    |        |                                   |



|      |                          |                |                |                |               |      |     |     |  |  |     |     |      |                  |
|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|------|-----|-----|--|--|-----|-----|------|------------------|
| 9.1  | Участок хондры           | 6.0<br>(0.18)  | 3.6<br>(0.16)  | 37.5<br>(0.10) |               |      |     |     |  |  | 1.6 | 0.7 | 49.3 | Хлорапатит – 1.3 |
| 9.2  | Участок хондры           | 87.0<br>(0.15) | 0.8            |                |               |      |     |     |  |  | 0.7 | 0.4 | 10.3 | Хлорапатит – 1.6 |
| 9.3  | Рудная частица на хондре |                |                |                |               |      |     |     |  |  |     |     |      |                  |
| 9.4  | Матрица возле хондры     | 13.7<br>(0.18) | 75.4<br>(0.18) | 4.4<br>(0.12)  | -<br>(N=0)    | 3.3  |     |     |  |  | 0.6 | 2.0 |      | Ильменит – 0.6   |
| 9.5  | Матрица возле хондры     | 30.6<br>(0.18) | 60.2<br>(0.18) | 3.4<br>(0.10)  | 0.4<br>(N=13) | 2.9  |     |     |  |  | 0.5 |     |      |                  |
| 10.1 | Участок хондры           | 39.0<br>(0.18) | 11.0<br>(0.18) | 7.6<br>(0.10)  | 2.0<br>(N=8)  | 23.3 | 3.2 | 6.0 |  |  | 5.2 | 1.4 |      | Шрейберзит – 1.3 |
| 10.2 | Участок хондры           | 46.0<br>(0.16) |                | 2.0<br>(0.10)  | 3.7<br>(N=8)  | 45.9 | 2.0 |     |  |  |     | 0.4 |      | Камасит – 6.0    |
| 11.1 | Участок хондры           | 14.6<br>(0.18) | 38.8<br>(0.18) | 15.4<br>(0.10) | 1.0<br>(N=5)  | 19.9 | 2.9 |     |  |  | 6.6 | 0.8 |      |                  |
| 11.2 | Матрица возле хондры     | 52.6<br>(0.18) | 10.5<br>(0.18) |                |               |      |     |     |  |  | 2.9 |     | 34.0 |                  |
| 11.3 | Матрица возле хондры     | 17.7<br>(0.18) | 12.5<br>(0.18) |                |               |      |     |     |  |  | 0.9 |     | 68.9 |                  |
| 12.1 | Участок хондры           | 80.0<br>(0.19) |                | 2.5<br>(0.10)  | 1.5<br>(N=10) | 13.3 |     |     |  |  | 0.5 | 1.1 |      | Витлокиит – 1.1  |

Табл. 6

Среднее содержание нормативных минералов (вес. %) в метеорите Оханск, вычисленное по данным табл. 5

| Фрагмент         | OI             | OPx            | CPx           | Ap              | Ab   | Ort | Стекло | Хромит | Ильменит | Витлокиит | Повелит | Апатит |
|------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|------|-----|--------|--------|----------|-----------|---------|--------|
| Хондры (n = 16)  | 45.4<br>(0.17) | 10.7<br>(0.17) | 6.1<br>(0.10) | 2.2<br>(N = 10) | 19.2 | 1.0 | 3.7    | 0.7    | 0.3      | 0.13      | 0.14    | 0.18   |
| Матрица (n = 11) | 33.3<br>(0.18) | 25.6<br>(0.18) | 3.2<br>(0.13) | 1.1<br>(N = 9)  | 10.5 | 0.4 | 17.5   | 0.2    | 0.05     | 1.27      | 1.33    | -      |
| Общее (n = 27)   | 40.0<br>(0.17) | 16.8<br>(0.17) | 4.9<br>(0.11) | 1.1<br>(N = 10) | 15.7 | 0.7 | 9.3    | 0.5    | 0.2      | 0.60      | 0.63    | 0.11   |

Примечание:

1. В единичных анализах были установлены шпинель и шрейберзит в количестве 1–2%.
2. У минералов OI, OPx, CPx в скобках указан коэффициент железистости  $f = \text{Fe} / (\text{Mg} + \text{Fe})$ .
3. У минерала анортит в скобках указан номер плагиоклаза.

существенно, чем в матрице. Коэффициент железистости оливина и ортопироксена варьирует обычно в пределах 0.15–0.20, в среднем составляя 0.17, что позволяет относить Оханский метеорит к обыкновенным оливин-бронзитовым хондритам (группа Н). Железистость этих же силикатов в матрице чуть выше, чем в хондрах, что характерно для Н-хондритов. В одной из хондр (анализ 7.1, табл. 5) коэффициент железистости оливина и ортопироксена понижается до 0.13, что сближает их с углистыми хондритами. Содержание бронзита в матрице в 2.4 раза превышает его содержание в хондрах.

Третьим по распространенности силикатным минералом метеорита Оханск является плагиоклаз. Его номер варьирует в пределах 0–34 и в среднем составляет  $N = 10$ , причем в хондрах его номер чуть выше ( $N = 10$ ), чем в матрице ( $N = 9$ ). Содержание плагиоклаза в хондрах в 1.8 раза превышает его содержание в матрице. Четвертым по распространенности силикатным минералом в метеорите является клинопироксен диопсид. Он развивается как вторичный минерал по ортопироксену, вследствие метасоматического взаимодействия последнего с остаточным силикатным стеклом. Содержание диопсида в хондрах в 1.9 раза выше, чем в матрице.

Микрозондовые анализы показывают, что рудные минералы в метеорите представлены никелистым железом (чаще камаситом, реже тэнитом) и троилитом, в небольших количествах присутствует хромит, а в единичных анализах отмечаются витлокит, повелит, ильменит, апатит, шпинель, шрейберзит (табл. 2, 5, 6). В табл. 6 не приводятся данные по камаситу (тэниту) и троилиту, так как эти минералы распределены в метеорите крайне неравномерно, поэтому малое число анализов не дает правильного представления об их содержании и распределении. Их распределение в метеорите по данным оптической микроскопии было рассмотрено выше. По микрозондовым анализам хромит, ильменит, апатит чаще отмечаются в хондрах, а витлокит и повелит – в матрице (табл. 5, 6).

Рентгенофазовый анализ метеорита показал, что он сложен теми же главными минералами, которые обнаруживаются кристаллооптическим методом и которые расчетным путем выявляются рентгенофлуоресцентным (табл. 2) и микрозондовым анализами (табл. 5, 6), то есть оливин, бронзитом, диопсидом, плагиоклазом, и рудными – камаситом, троилитом.

### Заключение

Настоящее исследование вещества метеорита Оханск позволяет констатировать следующее. Метеорит относится к группе оливин-бронзитовых хондритов (группа Н). В его составе доминируют оливин и бронзит, в значительных количествах присутствуют плагиоклаз и диопсид. Главными рудными минералами являются камасит и количественно подчиненный ему троилит. В качестве акцессорных минералов в метеорите нами были обнаружены хромит, витлокит, шрейберзит, шпинель, повелит, ильменит, апатит, причем три последних минерала в метеорите обнаружены впервые. На основе представленного выше анализа состава (табл. 1–6) и структуры (рис. 1–8) Оханского метеорита можно заключить, что его вещество формировалось, скорее всего, в условиях низких давлений и высоких температур и позднее не подвергалось воздействию эндогенных термобарических преобразований в глубине недр материнского протопланетного тела,

поэтому сохранило информацию о самых ранних стадиях аккреции протопланетного вещества Солнечной системы.

Подчеркнем основные особенности ранней эволюции вещества Протосолнечной туманности, проявляющиеся в метеорите Оханск.

Пылеватое вещество туманности в момент взрыва сверхновой звезды в ее окрестности было расплавлено. Образовались капельки оливинового, бронзового, полевошпатового и рудного расплавов. Капли расплавов и продукты их раскристаллизации сразу же вовлекались в процесс аккреции под воздействием гравитационных сил. Этим объясняется наличие в метеорите мелких мономинеральных оливиновых и бронзовых хондр, свидетельствующих о том, что пылеватое вещество Протосолнечной туманности было представлено мономинеральными по составу пылинками. Более крупные хондры в метеорите обычно являются полиминеральными, свидетельствуя об аккреции жидких капель расплавов разного состава. Рудные расплавы в период аккреции обособлялись от силикатных расплавов вследствие их несмесимости, а более низкая температура их кристаллизации, как и у остаточных полевошпатовых расплавов, обусловили им роль цементирующего материала, скрепляющего более высокотемпературные минеральные образования, их обломки и хондры. Наличие крупных (до 1–2 мм) стекловатых хондр свидетельствует о том, что остывание силикатных расплавов в условиях космического вакуума происходило очень медленно и при отсутствии активирующих кристаллизационных факторов возникли переохлажденные расплавы, которые и порождали стекловатые хондры. Если эти переохлажденные силикатные расплавы испытывали аккреционные удары закристаллизованных хондр, то под действием этой активационной ударной энергии переохлажденные расплавы начинали раскристаллизовываться. Быстрая их раскристаллизация приводила к образованию лучистых бронзовых хондр с остаточным силикатным стеклом, скрепляющим лучистые выделения бронзита. Иногда эти переохлажденные расплавы начинали свою раскристаллизацию с образования оливина, но так как вязкость этих переохлажденных расплавов была повышенной и не обеспечивала быстрого транспорта питательных веществ к растущему кристаллу, то вырастали скелетные кристаллы оливина, пронизанные силикатным стеклом, и возникали колосниковые структуры хондр с большим количеством остаточного силикатного стекла. Иногда этот остаточный силикатный расплав производил метасоматические преобразования, замещая оливин ортопироксеном, а ортопироксен клинопироксеном, порождая симплектитовые структуры в хондрах.

В процессе аккреции при взаимных столкновениях хондры и их агрегаты могли дробиться и образующиеся обломки вместе с мелкими хондрами образовали матрицу материнского тела, представляющую собой обломочный агрегат с рассеянными в нем остающимися крупными хондрами. Так как температура кристаллизации рудных и остаточных силикатных расплавов была ниже температуры кристаллизации оливина и пироксенов, эти остающиеся жидкие расплавы в процессе аккреции растекались и заполняли поровое пространство между обломками и по границам хондр, играя роль цемента. Так, по нашим представлениям, было образовано материнское тело, при распаде которого из его наружной части образовался метеорит Оханск.

**Литература**

1. *Сонин Г.В., Бахтин А.И., Осин Ю.Н., Петрова Р.Д.* Изучение микроструктуры и состава Оханского метеорита // Ежемес. науч. журн. «Prospero». – 2015. – № 2. – С. 132–140.
2. *Маракушев А.А., Грановский А.В., Зиновьева Н.Г., Митрейкина О.Б.* Космическая петрология. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. – 325 с.
3. *Соботович Э.В.* Изотопная космохимия. – М.: Атомиздат, 1974. – 208 с.
4. *Kaushal S.K., Wetherill G.W.* Rb<sup>87</sup>–Sr<sup>87</sup> age of bronzite (H group) chondrites // J. Geophys. Res. – 1969. – V. 74. – P. 2717–2726.
5. *Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г.* Справочник по геохимии. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
6. *Кузнецов В.Г.* Литология. Осадочные горные породы и их изучение. – М.: Недра, 2007. – 511 с.
7. Минералогические таблицы. Справочник / Под ред. Е.И. Семенова. – М.: Недра, 1981. – 399 с.

Поступила в редакцию  
24.09.16

---

**Бахтин Анатолий Иосифович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и литологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [Anatoly.Bakhtin@kpfu.ru](mailto:Anatoly.Bakhtin@kpfu.ru)

**Сонин Геннадий Владимирович**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий монографическим отделом Геологического музея КФУ

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [g\\_sonin@mail.ru](mailto:g_sonin@mail.ru)

**Сунгатуллин Рафаэль Харисович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры региональной геологии и полезных ископаемых

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [Rafael.Sungatullin@kpfu.ru](mailto:Rafael.Sungatullin@kpfu.ru)

**Петрова Римма Даниловна**, главный хранитель Геологического музея КФУ

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [Rimma.Petrova@kpfu.ru](mailto:Rimma.Petrova@kpfu.ru)

**The Okhansk Meteorite:  
Specifics of Composition, Structure, and Genesis**

*A.I. Bakhtin*<sup>\*</sup>, *G.V. Sonin*<sup>\*\*</sup>, *R.Kh. Sungatullin*<sup>\*\*\*</sup>, *R.D. Petrova*<sup>\*\*\*\*</sup>

*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: *\*Anatoly.Bakhtin@kpfu.ru, \*\*g\_sonin@mail.ru,*

*\*\*\*rafael.sungatullin@kpfu.ru, \*\*\*\*Rimma.Petrova@kpfu.ru*

Received April 24, 2016

**Abstract**

The Okhansk meteorite fell on August 18, 1887 near the village of Tabor, about 15 km away from the town of Okhansk in Perm province and weighed 186.5 kg (the total weight of collected fragments, according to P.I. Krotov, was more than 245 kg). The shock wave from the meteorite entry knocked down animals and riders on horses. Despite the fact that it was significantly stronger than that caused by the Chelyabinsk meteorite of 2013, all information about this meteorite has completely erased from people's memory. It has been shown that the meteorite is an ordinary olivine-bronzite chondrite. Its main silicate minerals are olivine, bronzite, plagioclase, and diopside. The main ore minerals are kamacite and troilite. The meteorite contains silicate glass in large amounts. The analysis of the composition and structure of the Okhansk meteorite has demonstrated that it was formed at the early stages of accretion of the melted substance of the protosolar nebula without undergoing endogenous, temperature, or pressure changes.

**Keywords:** Okhansk meteorite, chondrites, protosolar nebula, genesis

**Figure Captions**

- Fig. 1. Orthopyroxene-olivine chondrule. OPx in the center, Ol in the periphery. Black color – ore minerals.  
Fig. 2. Dark-gray silicate glass in the center of the olivine chondrule.  
Fig. 3a. Olivine-orthopyroxene chondrule in the olivine-orthopyroxene-plagioclase chondrule (chondrule in chondrule). Single nicol.  
Fig. 3b. The same in crossed nicols.  
Fig. 4. Olivine chondrule (in the center). The plagioclase chondrule with olivine inclusions on the left. Nicols +.  
Fig. 5. Accretion of two granular olivine chondrules. The orthopyroxene chondrule adjoins from the above. Black color – ore minerals.  
Fig. 6. Radial orthopyroxene chondrule. Single nicol.  
Fig. 7. The chondrule consisting of silicate glass with pyroxene microlites and fine-grained albite residual cells. Single nicol.  
Fig. 8. Kamacite Km (white) and troilite Tr (pink) releases in the matrix.  
Fig. 9. Olivine-pyroxene-plagioclase chondrule (analysis 7.1 in Table 4, 5).

**References**

1. Sonin G.V., Bakhtin A.I., Osin Yu.N., Petrova R.D. The study of microstructure and composition of the Okhansk meteorite. *Prospero*, 2015, no. 2, pp. 132–140. (In Russian)
2. Marakushev A.A., Granovskii A.V., Zinov'eva N.G., Mitreikina O.B. *Space Petrology*. Moscow, Izd. Mosk. Gos. Univ., 1992. 325 p. (In Russian)

3. Sobotovich E.V. Isotopic Cosmochemistry. Moscow, Atomizdat, 1974. 208 p. (In Russian)
4. Kaushal S. K., Wetherill G.W.  $Rb^{87}$ - $Sr^{87}$  age of bronzite (H group) chondrites. *J. Geophys. Res.*, 1969, vol. 74, pp. 2717–2726.
5. Voitkevich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. Handbook on Geochemistry. Moscow, Nedra, 1990. 480 p. (In Russian)
6. Kuznetsov V.G. Lithology. Sedimentary Rocks and Their Study. Moscow, Nedra, 2007. 511 p. (In Russian)
7. Mineralogical Tables. Handbook. Semenov E.I. (Ed.). Moscow, Nedra, 1981. 399 p. (In Russian)

⟨ **Для цитирования:** Бахтин А.И., Сонин Г.В., Сунгатуллин Р.Х., Петрова Р.Д. Метеорит Оханск: особенности состава, строения и генезиса // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2016. – Т. 158, кн. 4. – С. 569–582. ⟩

⟨ **For citation:** Bakhtin A.I., Sonin G.V., Sungatullin R.Kh., Petrova R.D. The Okhansk meteorite: Specifics of composition, structure, and genesis. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2016, vol. 158, no. 4, pp. 569–582. (In Russian) ⟩