

УДК 52-44,523.44,552.63

ВЗАИМОСВЯЗЬ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Н5 ХОНДРИТОВ НА ПРИМЕРЕ NWA 12370 И PULTUSK

© 2021 г. С. А. Воропаев^{a, *}, И. И. Нугманов^b, Н. В. Душенко^a, Т. Г. Кузьмина^a,
А. В. Корочанцев^a, В. Г. Сенин^a, А. А. Елисеев^c, Я. Джинго^d

^aИнститут геохимии и аналитической химии (ГЕОХИ) РАН, Москва, Россия

^bКазанский федеральный университет, Казань, Россия

^cМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^dУханьский университет, Ухань, Китай

*E-mail: voropaev@geokhi.ru

Поступила в редакцию 02.09.2020 г.

После доработки 06.04.2021 г.

Принята к публикации 08.06.2021 г.

Методами Рамановской спектроскопии, РФЛА и электронного зондирования детально изучены особенности состава и внутренней структуры хондрита NWA 12370, петрологический тип Н5 S1 W1. С помощью ультразвуковых волн и статическими методами изучены механические свойства хондрита в зависимости от внешнего гидростатического давления. Данный метеорит является фрагментом каменного дождя из обломков внутренней части крупного астероида, размером порядка 200 км. Проведено сравнение полученных механических характеристик с другим хорошо изученным хондритом Pultusk того же типа, ударная брекчия Н4/Н5 S2 W1. На ранней стадии Солнечной системы такие планетизимали вносили существенный вклад в геохимическую эволюцию планет Земной группы. Понимание особенностей связи внутренней структуры и упругих свойств Н хондритов важно как для оценки их вклада в состав коры и верхней мантии Луны и Земли, так и для уточнения условий формирования окислительно-восстановительного (редокс) потенциала недр планет.

Ключевые слова: планетизимали, деформации, ударная эволюция, упругость, хондриты, редокс потенциал, тепловой метаморфизм

DOI: 10.31857/S0320930X2105008X

ВВЕДЕНИЕ

Процессы ранней аккреции планетизималей и их участие в формировании планет Земной группы являются важными научными проблемами. Помимо единичных миссий к малым телам Солнечной системы с возвратом реголита, метеориты остаются уникальным внеземным материалом. Они доступны для прямого лабораторного изучения особенностей химического состава и процессов дифференциации материи на этапе формирования протопланетного диска. К сожалению, они не являются первозданной материей, так как прошли как минимум четыре этапа теплового метаморфизма (Wasson, Kallemeyn, 1988), а также ряд ударных преобразований, что отражается в принятой международной классификации степенями от S₀ до S₄, ударная классификация (Stöffler и др., 1991). Многие метеориты являются остатками своих родительских тел — крупных астероидов, разрушившихся в результате столкновения, и образовавших семейства более мелких тел, а также могут представлять части планетизималей,

прошедших полную или частичную дифференциацию. Изучение состава таких обломков дает ценную информацию для понимания процессов геохимической эволюции тел Солнечной системы.

Выпадающие на Землю каменные метеориты содержат значительную часть хондритов типа Н (High относится к содержанию восстановленного железа), что указывает на их важную роль в формировании окислительно-восстановительных условий недр планет Земной группы. В настоящее время утвердилась “луковичная”, или слоистая, модель внутренней структуры родительских тел Н-хондритов (Miyamoto и др., 1981). В ней петрологический тип Н6 соответствует центральной части, Н5 — средней, Н4 и Н3 — верхней части и поверхности астероида. Считается, что расплав в ходе радиоактивного нагрева не возникает и данное разделение помогает лучше понять особенности хондритов различных типов по составу и степени теплового метаморфизма. Глубина залегания, структура и состав вещества, а также размер родительского тела, определяют

тепловой поток к поверхности, скорость охлаждения и максимальную температуру соответствующего слоя. В ряде случаев, численное моделирование позволило достаточно надежно оценить размер родительских тел (радиус до 200 км), время их формирования (первые 10 млн лет) и тепловой режим, обусловленный радиоактивным распадом Al^{26} (Ghosh и др., 2003).

Как правило, наблюдается отрицательная корреляция между петрологическим типом и скоростью остывания, т.е. чем выше тип и, тем самым, глубже располагалось вещество, тем ниже скорость остывания. Выше лежащие слои служили теплоизоляцией, ограничивая вынос тепла. Но существует ряд Н-хондритов, для которых это правило нарушается и, скорее, реализуется положительная корреляция. Для таких исключений предложена двух-стадийная модель эволюции родительского астероида, когда он собирается из “горячих” фрагментов, размером около 1 км, с их последующим медленным остыванием в крупном теле (Henke и др., 2013). Также удары глыб (не обязательно Н типа) могли происходить на самых ранних этапах формирования растущего родительского тела, изменяя его состав и тепловой режим. Луна и Земля сформировались значительно позднее (первые 50–100 млн лет) и падение крупных Н планетизималей на их поверхности могло вызывать существенные геохимические изменения в первичной коре и верхней мантии по составу за счет привнесенного вещества (Burkhardt и др., 2017).

Важным механизмом регулирования геохимической обстановки, в частности редокс-потенциала, у планетизималей являлось проникновение капель ударного расплава, содержащего сидерофильные элементы, через силикатную матрицу (Yoshino и др., 2003). Этот процесс сильно затруднен тем, что капли расплава Fe–Ni и сульфидов для оливин-содержащих пород хондритов являются плохо смачивающими жидкостями (Ballhaus, Ellis, 1996). Теоретические исследования показали, что в этих условиях для преодоления порога перколяции необходимо объемное содержание металлического расплава не менее 4–6%. Но, недавние эксперименты уточнили, что данный порог существенно понижается при наличии значительных сдвиговых деформаций за счет формирования связанной сети капель расплава (Bruhn и др., 2000; Groebner, Kohlstedt, 2006). Этот механизм геохимического регулирования применим и для планет земной группы, хотя формирование их состава и внутренней структуры проходило через фазу развитого магматического океана (МО). На ранней стадии эволюции металлические расплавы опускались на дно МО и двигались дальше к центру планеты через суб-солидную силикатную мантию. В отличие от планетизималей, где сдвиговые деформации в основном производились столкновениями (Tomkins и др.,

2013), у планет с МО важную роль играли приливные взаимодействия.

Очевидно, что основные механические свойства Н хондритов, такие как прочность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона, играли при деформации родительских тел важную роль. В ряде работ были проведены статические исследования физических характеристик хондритов, в основном при стандартных условиях поверхности Земли, давление 1 атм (Медведев, 1985). Динамические условия и повышенное внешнее давление использовалось при создании паспорта прочности горных пород и ряда важных материалов, разработаны методики для взвешенного вещества (Hogan и др., 2015; Воропаев и др., 2017). Если учесть размеры предполагаемых родительских тел, то малое статическое собственное давление явно недостаточно для адекватного рассмотрения процессов столкновения и приливных деформаций (Воропаев и др., 2020).

Для сравнения мы выбрали фрагменты двух каменных “дождев” Н-хондритов схожего состава – Pultusk, ударная брекчия Н4/Н5 (см. рис. 1б), и NWA 12370, Н5 (см. рис. 1а), оба близкого петрологического типа, но с различными степенями ударного преобразования. Pultusk был найден после падения в Польше в 1868 г. и детально исследован (Maneckí, 1972). NWA 12370 является свежей находкой в Сахаре, степень выветривания W1 (Lorenz, 2020). Мы исследовали динамическими и статическими методами механические свойства хондрита NWA 12370 в зависимости от внешнего гидростатического давления до 50 МПа и провели сравнение с известными аналогичными свойствами хондрита Pultusk (Медведев, 1985). Выявлены существенные отличия основных упругих величин, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, и сделаны оценки влияния ударных воздействий на пределы прочности пород астероидов S-типа.

СОСТАВ И СТРУКТУРА NWA 12370 И PULTUSK

Химический и минералогический состав исследуемого метеорита определялся с использованием нескольких методов.

РФЛА. Рентгено-флуоресцентный анализ осуществлялся на спектрометре AXIOS Advanced (фирма PANalytical B.V., Голландия). Исследуемые пробы не подвергались предварительной подготовке к анализу и представляли собой пластины толщиной 1 мм, вырезанные из небольших штучных образцов. В центре пластин исследовались площадки диаметром 20 мм. Правильность определения концентрации Ni проверена по стандартному образцу состава SW. Для этих проб использовали программу полуколичественного

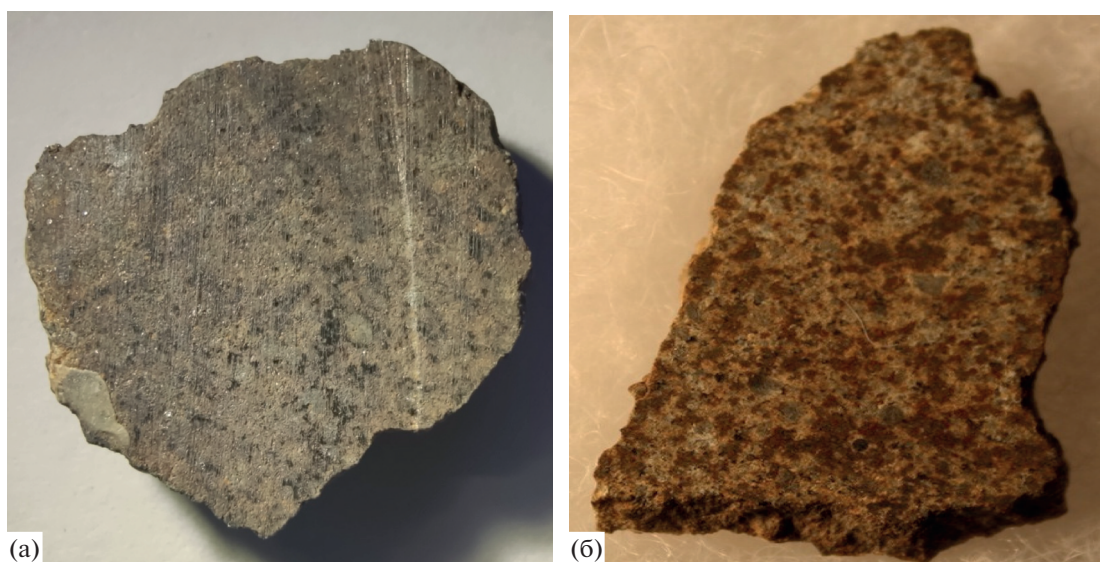


Рис. 1. Внешний вид Н-хондритов: (а) NWA 12370; (б) Pultusk.

анализа, основанную на измерении интенсивности всех аналитических линий К и L серий спектра характеристического излучения пробы от кислорода до урана. Расчет концентраций проводился по методу фундаментальных параметров.

ЕРМА. Более детальный анализ состава индивидуальных минеральных дерен и металлических фаз проводился микрозондированием электронным пучком с пятном 3 мкм. Установка Cameca SX-100, ГЕОХИ РАН, использовалась в различных режимах для силикатов и Fe–Ni сплавов, с ускоряющим напряжением 15 и 20 keV, соответственно.

Ток силой 20, 10, и 7 нА применялся для исследования силикатов, сульфидов и карбонатов, соответственно. Время сбора данных по каждому элементу составляло 40 с. Для калибровки ис-

пользовались природные стандарты и алгоритм PAP (Pouchou, Pichoir, 1984) пересчета сигнала в концентрацию элемента (вес. %).

Химический состав основных силикатов (оливины, ортопироксены) метеорита NWA 12370 представлен в табл. 1. Там же приведен химический состав хондрита Pultusk по работе (Krzyszewska, 2014), включая минералы основного тела (H4) и ударника (H5). В целом, составы близки и соответствуют хондритам Н типа, степень теплового метаморфизма H4–H5 (Jarosewich, 1990).

Содержание Co, Ni, Fe, S и летучих в металлических сплавах Fe–Ni позволяет оценить условия образования родительских тел исследуемых метеоритов. Химический анализ NWA 12370 и Pultusk показал, что количество Ni и Co находятся в интервале концентраций, характерных для обык-

Таблица 1. Химический состав основных минералов (силикатов)

Компонент, вес. %	Оливин NWA 12370	Оливин (H4) Pultusk	Оливин (H5) Pultusk	Пироксен NWA 12370	Пироксен (H4) Pultusk
SiO ₂	39.186	38.7	39.6	55.468	55.9
TiO ₂	0.026	—	—	0.083	0.17
Al ₂ O ₃	0.023	—	0.03	0.553	0.22
Cr ₂ O ₃	0.035	0.04	0.04	0.325	0.10
FeO	18.165	17.5	15.9	11.710	11.3
MnO	0.520	0.43	0.29	0.557	0.51
MgO	41.730	42.5	44.0	29.220	30.8
CaO	0.030	0.12	0.08	1.435	0.66
Na ₂ O	0.003	—	—	0.052	0.10
Total wt %	99.718	99.29	99.94	99.403	99.76

Таблица 2. Состав металлических фаз хондритов NWA 12370 (Н5) и Pultusk (Н4/Н5)

Элемент, мкг/г	Камасит NWA 12370	Камасит Pultusk	Тетратэнит NWA 12370	Тетратэнит Pultusk	Тэнит NWA 12370	Тэнит Pultusk
Si	0.027	—	0.040	—	0.030	—
Cu	—	0.02	—	0.36	—	0.14
S	0.030	—	0.020	—	0.005	—
P	0.130	—	0.130	—	0.155	—
Cr	0.027	—	—	—	0.040	—
Fe	90.847	93.43	51.99	51.62	76.365	74.27
Ni	6.893	5.96	50.210	48.20	25.330	26.05
Co	0.480	0.55	0.180	0.09	0.150	0.23
Ni/Co	14	11	—	—	—	—

новенных Н-хондритов (см. табл. 2). Со и Ni — сидерофильные элементы и проявляют одинаковые свойства, как на Земле, так и в условиях космического пространства. Согласно термодинамическим расчетам 50% конденсация основных элементов Si, Fe, Mg из газа состава солнечной атмосферы достигается при температурах 1183–1203 К, соответственно, при давлении p_{H_2} порядка 0.1 Па (Wasson, Kallemeyn, 1988). Хром, кобальт и никель конденсируются при схожих условиях и группа из этих шести элементов служит граничной меткой на шкале летучести. Элементы, которые испаряются/конденсируются при более высоких температурах называются тугоплавкими (refractory), а те, что при более низких — летучими (volatiles). Соотношение Ni/Co в зернах камасита исследуемых образцов ясно указывает на то, что в них сохранился элементный состав тугоплавких ранней Солнечной системы. С другой стороны, близкий по Ni состав фаз камасита, тетратэнита и тэнита у сравниваемых метеоритов, указывает на единый источник металлических сплавов Fe–Ni и длительный период охлаждения после пика нагрева (Cassamiani, 2006).

Рамановская спектроскопия. Для снятия спектров комбинационного рассеяния (КР) использовался прибор Renishaw InVia Reflect Spectrometer System, ЦКП Химический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова. Возбуждение колебаний решетки осуществлялось с помощью лазерного излучения мощностью 300 мВт с длиной волны 785 нм. Для анализа чувствительных к нагреву минералов, использовался лазер мощностью 100 мВт с длиной волны 532 нм. Рамановский спектрометр имел разрешение 1–2 1/см. Точность волнового числа составляла не менее 0.5 1/см и калибровалась с помощью кремниевого стандарта каждый рабочий день. При этом Рэлеевская линия рассеянного лазерного излучения была настроена на нулевое положение при получении каждого спектра для исправления возможного сдвига волнового числа инструмента. Для получения спектров

использовался высокоэффективный спектрограф с фокальной длиной 250 мм (>30% поступления рассеянного света). Диаметр лазерного пятна варьировался от 1 до 300 микрон в фокальной плоскости в зависимости от объектива и длины излучения. Для точечных измерений применялась временная серия из 10 измерений, 8 с каждое, с последующим усреднением. Коррекция фона и анализ спектров были сделаны с использованием встроенного программного обеспечения InVia Renishaw.

Рамановские спектры (см. рис. 2) основных породообразующих фаз (оливины, пироксены, троилит и Fe–Ni сплав) позволяют, помимо состава, оценить и структурные изменения минералов.

Оливин. Рамановские спектры кристаллов оливина характеризуется двумя линиями с интенсивностью около 868–837 см^{-1} (ν_1 , Si–O ассиметричные валентные колебания) и 825–808 см^{-1} (ν_2 , Si–O симметричные валентные колебания), менее интенсивные линии соответствуют колебаниям групп SiO_4 и низкочастотным состояниям решетки (Kuebler и др., 2006). Известно, что частоты ν_1 , ν_2 КР спектра уменьшаются с увеличением содержания Fe, кроме того зависят от доли примесей Mn, Ca, Co, Ni и др. в образце (Mouri, Enami, 2008). Расположение линий ν_1 , ν_2 в полученном спектре варьируется в узком интервале возле величин 853 и 820 см^{-1} , соответственно. Согласно калибровочным кривым для оливина, большая часть зерен характеризуется средним составом $\text{Fa}_{20}\text{Fo}_{80}$.

Ортопироксены. КР спектр пироксенов был исследован нами как для отдельных зерен, так и для матрицы между включениями оливина. Зерна пироксена имеют область, характерную для Mg–Fe серии энстатит–ферросилит. Наиболее интенсивные линии соответствуют частотам 1007, 660/681 и 336 см^{-1} , что говорит о минерале состава $\text{En}_{17}\text{Fs}_{82}\text{Wo}_1$. Также, были обнаружены акцессор-

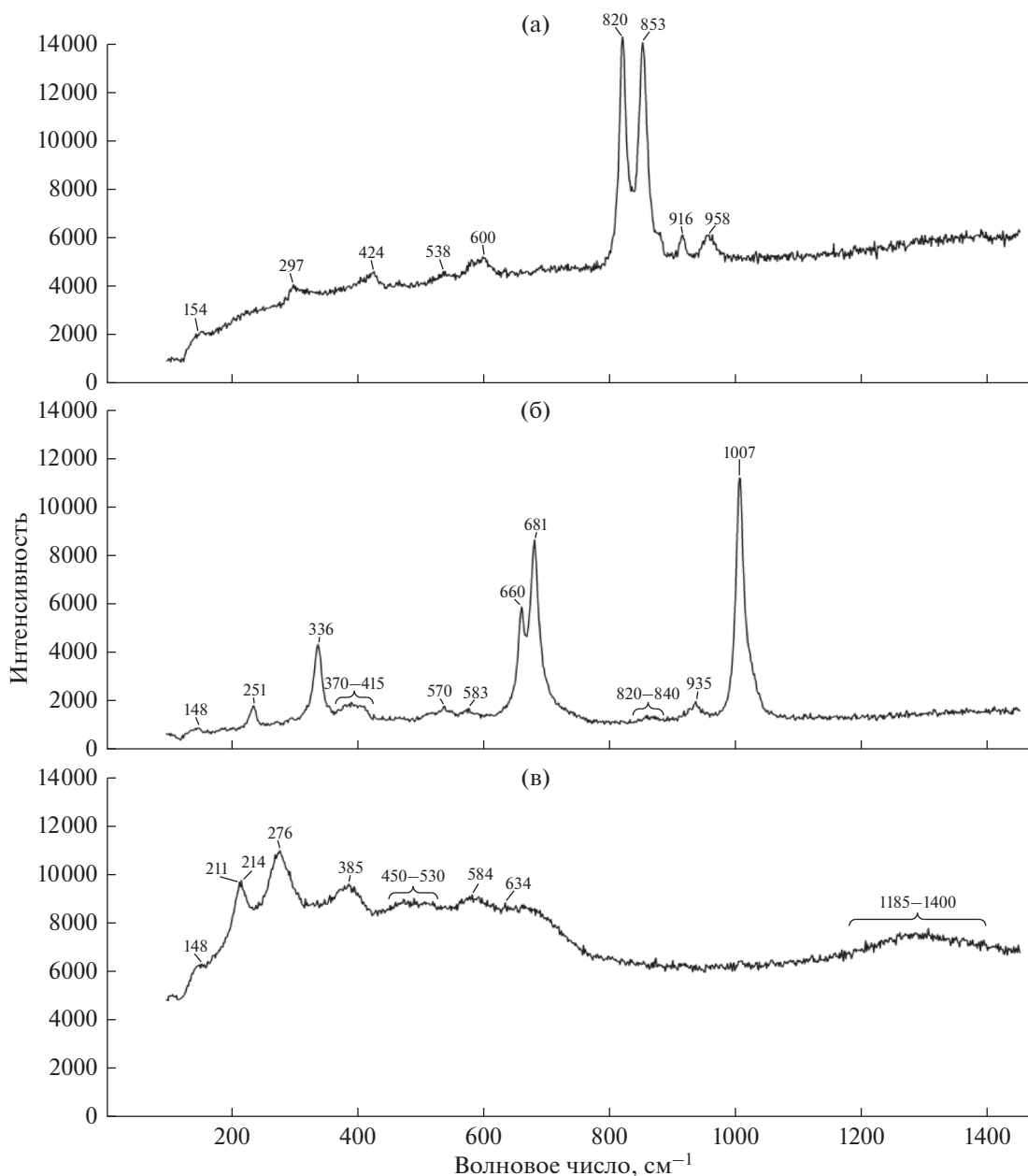


Рис. 2. КР спектры основных минералов NWA 12370: (а) оливин + мериллит; (б) пироксен; (в) троилит.

ные фосфатные минералы, в частности, мериллит — $\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$. Отмечается равновесность состава основных минералов, содержание элементов в них колеблется в пределах 1–2%.

Петрологический анализ показал, что метеорит NWA 12370 имеет хондритовую структуру, т.е. содержит хондры и их фрагменты, погруженные в тонкозернистую перекристаллизованную матрицу (см. рис. 1а). Средний диаметр хондр 464 ± 239 мкм ($N=100$). Хондры хорошо выражены, но контакты хондр с матрицей не вполне четкие. Хондры представлены следующими типами: балочный (колосниковый), радиально лучистый пироксе-

новый, гранулярный оливиновый, микропорфировый оливиновый, криптокристаллический. В основном хондры изоморфные, округлые, единичные хондры имеют эллиптическую морфологию; также присутствуют агрегаты слипшихся хондр (т.н. компаунды). Обломки хондр имеют максимальные размеры до 1200 мкм. В метеорите встречаются редкие 400–500 мкм обломки микрозернистых пород с включениями фрагментов оливина, никелистого железа и троилита, вероятно обломки девитрифицированного ударного расплава. Обломки минералов представлены оливином и пироксеном, реже полевым шпатом,

единичные обломки оливина достигают размера 1200×500 мкм и, возможно, являются ксенолитами. Матрица состоит из мелких (<50 мкм) зерен оливина, второстепенных пироксена, стекла и полевого шпата. Акцессорными минералами являются хромит и фосфат кальция (мериллит). Хромит присутствует в виде зерен в матрице, а также образует агрегаты с силикатными минералами. Средний размер зерен хромита 20 мкм. Изредка, относительно крупные (60–100 мкм) зерна хромита находятся в сростании с никелистым железом. Мериллит обнаружен в виде редких выделений неправильной формы в ассоциации с оливином.

На основании анализа хондр и кристаллической матрицы метеорит NWA 12370 отнесен к петрологическому типу 5 (Hutchison, 2004). Составы оливина (Fa19.3) и пироксена (En16.1Wo1.5) находятся в интервалах составов этих минералов в обыкновенных хондритах химической группы Н. Оливин в хондрах и в матрице демонстрирует прямое и иногда волнистое погасание в поляризованном проходящем свете, и обладает незначительно развитой трещиноватостью, что соответствует стадии ударного метаморфизма S1 (Stöffler и др., 1991). Также это подтверждает узкая форма основных линий КР спектра силикатов (см. рис. 2а, б) с малой полушириной, соответствующей слабо деформированной кристаллической решетке. Вероятно, по завершении термального метаморфизма метеорит не испытывал ударных нагрузок свыше 5–10 ГПа. Около 10 об. % металла замещено гидроксидами железа и никеля, продуктами земного выветривания метеорита. Fe, Ni гидроксиды представлены редкими узкими прожилками в основной массе метеорита. Наблюдаемое содержание гидроокислов соответствует стадии выветривания W1 (Wlotzka, 1993).

В отличие от NWA 12370, хондрит Pultusk является фрагментом ударной брекчии, смесью хондритов Н4 (основное тело) и Н5 (ударник) (Krzyszewska, 2014). Структура Pultusk во многом определяется ударом и связана с распространением неоднородной, не коаксиальной деформации в реголите родительского тела, сопровождавшей ударное событие. Этот процесс вызвал образование сдвиговых трещин в светлых хондритовых фрагментах, внедрение включений и образование фрикционного расплава, что способствовало литификации брекчии. Видимо, одновременно с хрупкой деформацией силикатов происходила и пластическая деформация металлических Fe–Ni зерен. Они удлинялись и располагались в соответствии с направлением сдвига, создавая наблюдаемое слоение и линеаризацию (см. рис. 1б). Наблюдаемое уширение характерных линий КР спектров силикатов Pultusk (Krzyszewska, 2014) также свидетельствует о значительной деформации

кристаллической решетки, что соответствует стадии ударного метаморфизма S2 (Stöffler и др., 1991).

МЕТОДИКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Динамические ультразвуковые (УЗВ) физико-механические испытания образцов хондрита NWA 12370 были выполнены на установке ПИК-УЗ-УЭП, Институт геологии КФУ. Данная установка предназначена для измерения электрических и упругих свойств породы в условиях, моделирующих пластовые условия (всестороннее давление до 100 МПа, температура до 150°C) с контролируемым внутрипоровым давлением насыщающих флюидов при трехосном нагружении образцов для ультразвуковых исследований. Внешний вид установки представлен на рис. 3а.

Статические прочностные испытания образцов выполнены на установке ГТЯН.441179.050, Институт геологии КФУ. Это автоматизированная система для комплексных испытаний горных пород при нормальных и повышенных термобарических параметрах, моделирующих природные условия. Основные характеристики установки ГТЯН.441179.050 используемые для проведения испытаний:

- Осевая нагрузка 500 кН;
- Создание порового и обжимного давления до 70 МПа;
- Возможность негидростатического 3-осного сжатия.

Внешний вид установки ГТЯН.441179.050 представлен на рис. 3б. Для проведения Бразильского теста (прочность на растяжение) обжимное давление не использовалось.

Как известно, скорости распространения продольной и поперечной ультразвуковой волны зависят от плотности, пористости и упругих характеристик среды. Управляющий блок ПИК-УЗ-УЭС позволил менять внешнее давление на образец NWA 12370 автоматически, по установленной процедуре, влияя тем самым на его плотность и пористость. Температура при измерениях не менялась, оставаясь комнатной $\sim 20^{\circ}\text{C}$, дополнительное увлажнение не использовалось. Измерительная часть ПИК-УЗ-УЭС состояла из двух ультразвуковых датчиков, источника сигнала, осциллографа, измерителя RLC и системы реле. Работа происходила следующим образом:

- источник генерирует сигнал частотой 1 МГц;
- сигнал поступает на один из датчиков, который возбуждает импульсы S и P волн;
- волны проходят через образец, установленный в кернодержатель, и детектируются вторым ультразвуковым датчиком измерения;

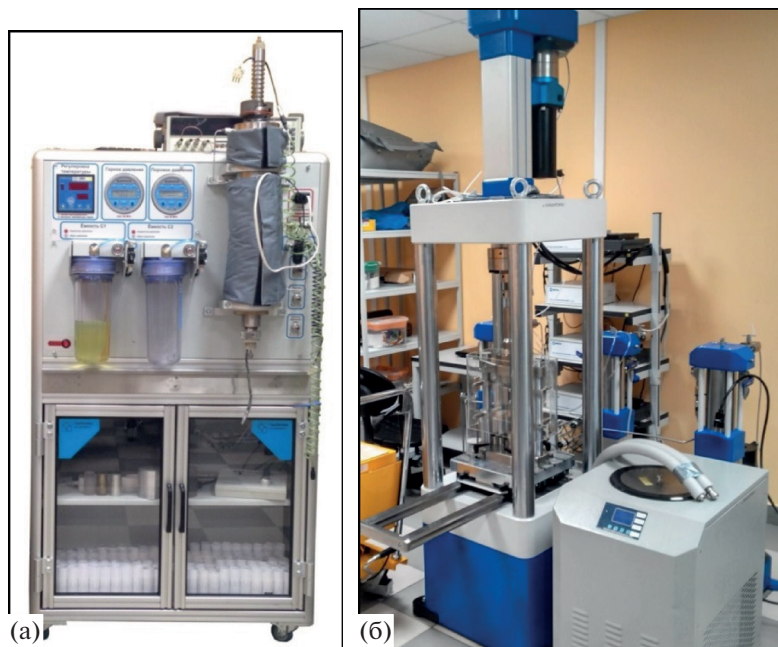


Рис. 3. Внешний вид установок для проведения геомеханических исследований: (а) ПИК-УЗ-УЭП; (б) ГТЯН.441179.050.

— полученный сигнал поступает на осциллограф, подключенный к компьютеру (ПК), для анализа и записи полученного сигнала.

Источник имеет три выходных сигнала: S волна, P волна и сигнал синхронизации источника с осциллографом. При измерении упругих свойств образца сигналы и общий кабель ультразвуковых датчиков коммутируются с источником сигнала и осциллографом с помощью реле. При измерении упругих свойств керна, на мониторе ПК происходит синхронизированное с осциллографом отображение графиков S и P волн. Графики отображаются в координатах “время-амплитуда”. С помощью встроенной программы обработки сигналов, исполнитель в интерактивном режиме отмечает время вступления каждой волны и происходит автоматический расчет скорости P и S волны (см. рис. 4).

Расчет динамических упругих модулей (Юнга и коэффициента Пуассона) проводился по формулам (1) и (2):

$$R = \frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}}, \quad (1)$$

$$E = V_p^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}, \quad (2)$$

где R отношение скоростей продольных и поперечных волн, V_p скорость продольных волн, V_s скорость поперечных волн, μ динамический ко-

эффициент Пуассона, E динамический модуль Юнга, ρ плотность пород.

Определение предела прочности на растяжение образцов хондрита NWA 12370 происходило с помощью Бразильского теста (методика ASTM D3967). Цилиндрический образец помещался в приспособление одноосного сжатия (см. рис. 5) между плитами-пуансонами. При помощи магнитных опор в продольной плоскости оси нагружения устанавливаются два датчика линейных деформаций, призванных фиксировать продольную деформацию образца. В средней части образца устанавливается кольцевая скоба датчика радиальной деформации.

Типичная процедура состоит из следующих этапов:

1. образец нагружают до начального напряжения (напряжения пригрузки), составляющего 1% от предела прочности при одноосном сжатии для стабилизации сборки;

2. осевая нагрузка увеличивается и уменьшается с заданной скоростью (например, 0.2 МПа/с) с использованием контроля по деформации в упругой области проведения испытаний по ветке “нагрузка-разгрузка”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

УЗВ динамические исследования хондрита NWA 12370 выполнены для цикла с увеличением гидростатического (всестороннего обжимного) давления и цикла разгрузки для ступеней давле-

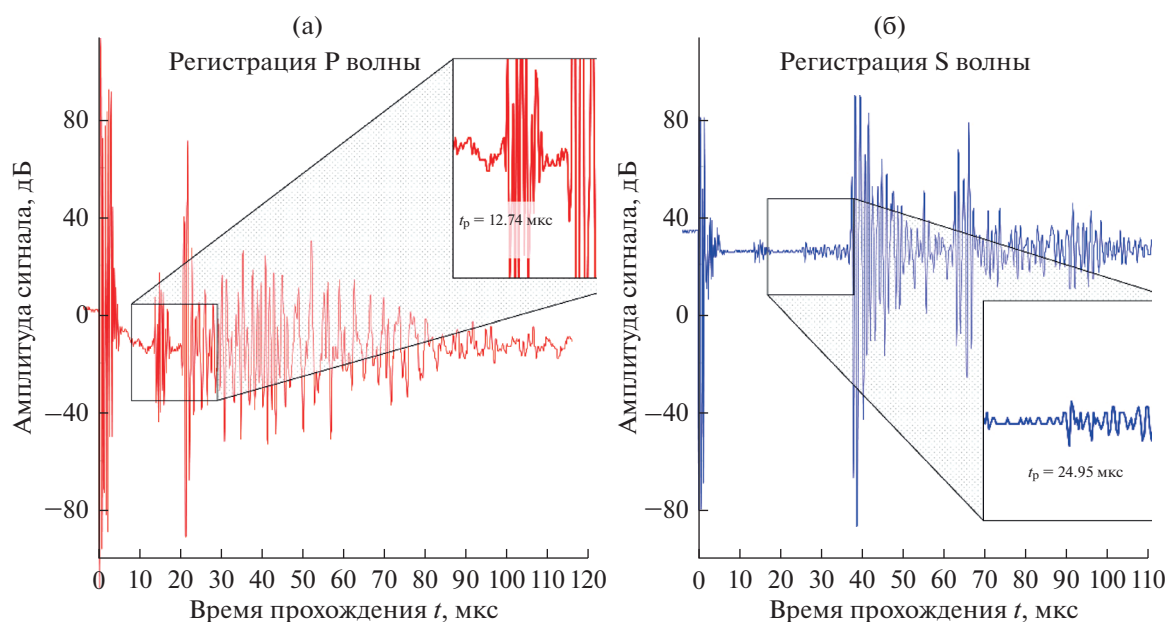


Рис. 4. Регистрация скорости продольной и поперечной волн. Гидростатическое давление 30 МПа.

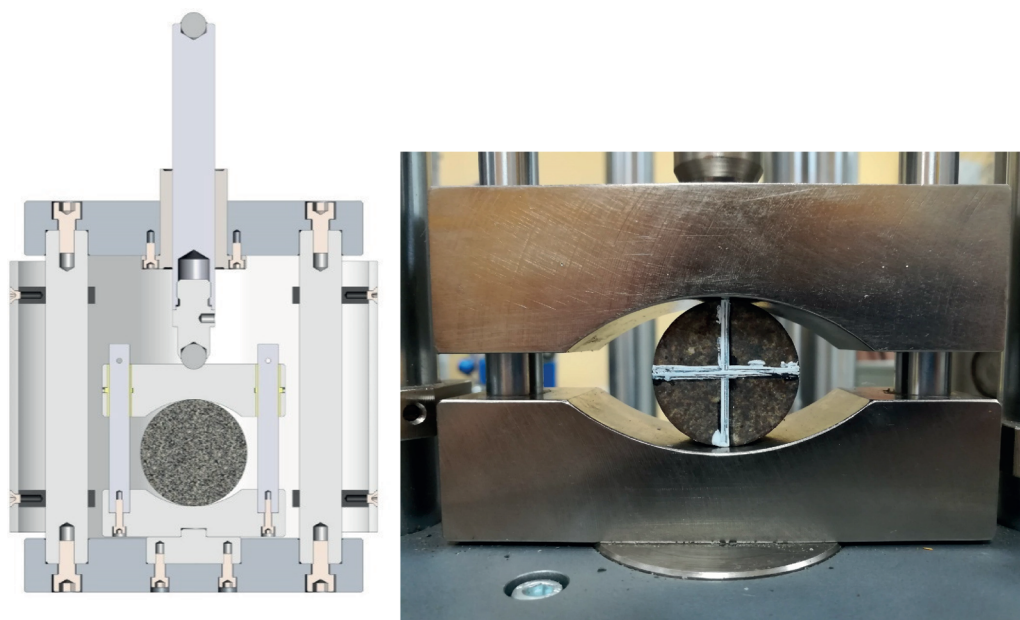


Рис. 5. Приспособление одноосного растяжения установки ГТЯН.441179.050 (Бразильский тест): схема (слева) и реализация (справа).

ния от атмосферного до 50 МПа (см. табл. 3), плотность образцов составляла 3.518 г/см³.

Расчет для определения предела прочности на растяжение при раскалывании (бразильский тест) осуществлялся по формуле (3):

$$\sigma_t = 2P/\pi LD, \quad (3)$$

где: σ_t предел прочности на растяжение при раскалывании, в МПа; P максимальная приложен-

ная нагрузка, зафиксированная датчиком силы испытательной машины, в Н; L толщина образца, в мм; D диаметр образца, в мм. Итоговые данные измерений прочности представлены в табл. 4.

Физико-механические характеристики хондрита Pultusk были исследованы в работе (Медведев, 1985) также динамическим методом УЗВ. Мы приводим ниже сводную табл. 5 свойств NWA 12370 (внешнее давление 1 и 50 МПа) и Pultusk

Таблица 3. Результаты определения скоростных и динамических упругих параметров H5 хондрита NWA 12370

Длина, мм	Диаметр, мм	Гидростатическое давление, МПа	Скорость поперечной волны, км/с	Скорость продольной волны, км/с	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
41.74	29.55	1	3.413	5.471	95.97	0.1814
		5	3.413	5.773	100.03	0.2314
		10	3.441	5.773	101.12	0.2245
		20	3.47	5.773	102.2	0.2173
		30	3.528	5.773	104.35	0.2019
		40	3.528	5.773	104.35	0.2019
		50	3.528	5.773	104.35	0.2019
		40	3.528	5.773	104.35	0.2019
		30	3.528	5.773	104.35	0.2019
		20	3.528	5.773	104.35	0.2019
		10	3.47	5.773	102.2	0.2173
		5	3.441	5.773	101.12	0.2245
		1	3.413	5.471	95.97	0.1814

Таблица 4. Предел прочности на растяжение при раскалывании NWA 12370

Номер образца	Диаметр D , мм	Толщина L , мм	L/D	Максимальная нагрузка P , в Н	σ_t , МПа
H5_1	29.57	16.71	0.57	11.914	15.349
H5_2	29.57	17.28	0.58	12.047	15.015

(без дополнительного внешнего давления) для удобства сравнения.

Известно, что физико-механические свойства горных пород, помимо минерального состава (прочность зерен), определяются еще и такими структурными параметрами как размер, форма и неоднородность зерен и пор, их взаимная ориентация и степень связи (Ржевский, Новик, 1978). Для H хондритов с высоким содержанием железа не менее важна пространственная топология металлических включений. Внутренняя структура Pultusk была исследована методом рентгеновской компьютерной томографии высокого разрешения (HR-XCT) с помощью сканера CT160 (Krzyszowska, 2017). Трехмерные реконструкции и петрологические исследования показали объемные скопления металла, размер ~ 1 см, причем при

контакте этих скоплений с хондритом возникло обогащение троилитом. Также, Pultusk содержит полосы, богатые плагиоклазом, с текстурами, предполагающими кристаллизацию из расплава. Было показано, что крупные зерна фосфатов связаны с плагиоклазом и состоят из скоплений мериллита, а также фторапатита и хлорапатита. Скопления металла образовались в результате ударного плавления, быстрой сегрегации металл-сульфидного расплава и включение этого расплава в трещиноватое основание ударного кратера. Воздействие, скорее всего, произошло в начале эволюции родительского тела хондрита Pultusk, когда постимпактное тепло было дополнено радиогенным теплом. Это способствовало медленному охлаждению и разделению металлического расплава на богатые металлами и сульфидами фракции с последующей перекристаллизацией

Таблица 5. Физико-механические свойства хондритов NWA 12370 (H5) и Pultusk (H4/H5)

Метеорит	Плотность, г/см ³	V_p , м/с	V_s , м/с	Коэф. Пуассона	Модуль Юнга, ГПа	Прочность сж., МПа	Прочность раст., МПа
Pultusk	3.56	5150	2860	0.27	76	213	31
NWA 12370, 1 МПа	3.518	5471	3413	0.1814	95.97	—	15.3
NWA 12370, 50 МПа	3.518	5773	3528	0.2019	104.35	—	15.3

хондрита в местах контакта с металлическими скоплениями и кристаллизации ударных расплавов.

В NWA 12370 петрологическими исследованиями было выявлено модальное содержание никелистого железа 7.5 об. %, троилита — 5.4 об. %. Никелистое железо (металл) образует зерна неправильной и ксеноморфной формы, которые имеют изрезанные границы с вмещающим силикатным веществом. Размер выделений металла от 40 до 600 мкм. Зерна металла имеют неоднородное строение, часть зерен состоит из камасита, другая часть представлена агрегатами камасита и тэнита с переменным соотношением фаз, иногда образующих плессито-подобную микроструктуру. Некоторые металлические зерна содержат включения силикатных минералов. Выделения троилита имеют размер <300 мкм, неправильную форму и изрезанные контакты с вмещающим веществом хондрита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании (Krziesinska, 2017) представлены находки прожилок металлических скоплений во фрагментах Pultusk, который определен как ударная брекчия Н4/Н5 хондритов. Эти скопления металлов связаны с хондритовым веществом, которое демонстрирует явные признаки ударного плавления, постшокового отжига и взаимодействия с сухим галоген-содержащим флюидом. Показано, что металлические скопления образовались в результате ударной плавки и быстрой сегрегации металл-сульфидного расплава от силикатов. Этот металл-сульфидный расплав, ускоренный градиентом давления от удара, переместился в трещиноватое основание кратера. Одновременно локально образовались силикатные ударные расплавы, а разрушенная порода в основании кратера была термически изменена и литифицирована. По сравнению с Pultusk, исследованный нами однотипный хондрит NWA 12370 не претерпевал столь существенных ударных воздействий и его первоначальная кристаллическая структура лучше сохранилась. Это нашло отражение в большей скорости продольной (5471 м/с вместо 5150 м/с) и поперечной (3413 м/с вместо 2860 м/с) волн. Изменился также модуль Юнга (96 ГПа вместо 76 ГПа) и коэффициент Пуассона (0.18 вместо 0.27).

Проведенные измерения показали также зависимость упругих свойств исследуемого Н5 хондрита, NWA 12370, от внешнего гидростатического давления. При повышении давления от 1 до 50 МПа, модуль Юнга изменяется приблизительно от 96 до 104 ГПа, а коэффициент Пуассона от 0.18 до 0.2. Для средней плотности хондритов 3.5 г/см³, планетизимали радиусом от 100 до 250 км (размер Весты) имеют давление в центре от 11 до 64 МПа.

Если залегание хондритов Н5 типа предполагается на существенной глубине в родительском астероиде, необходимо учитывать влияние внешнего давления на физические свойства пород при изучении их участия в процессах на ранних этапах развития Солнечной системы и в будущих миссиях автоматических межпланетных станций (АМС) с сейсмическим зондированием. Также представляется весьма перспективным исследование 3D структуры металлических включений полного ряда Н3—Н6 хондритов различных степеней ударного преобразования методом рентгеновской томографии. Такой анализ позволит в будущем более точно оценивать величину ударных воздействий и строить количественные модели эволюции недр родительских тел Н хондритов. Также, это позволит уточнить условия формирования металлических ядер планет земной группы в зависимости от величины испытанных приливных воздействий.

Авторы благодарят чл.-корр. РАН Ф.В. Каминского за критический просмотр текста и замечания, которые помогли существенно улучшить изложение результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00120, <https://rscf.ru/project/21-17-00120/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воропаев С.А., Кочеров А.В., Лоренц К.А., Корочанцев А.В., Душенко Н.В., Кузина Д.М., Нугманов И.И., Джинго Я. Особенности построения паспорта прочности внеземного вещества на примере метеорита Челябинск // ДАН. 2017. Т. 476. № 6. С. 635.
- Воропаев С.А., Джинго Я., Барриот Ж.-П. Разрыв вытянутого малого тела приливными силами Земли при подлете: возможные сценарии. 2020// Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 2. с. 171. (Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 2. P. 155.)
- Медведев Р.В., Горбачевич Ф.Ф., Зоткин И.Т. Определение физических свойств каменных метеоритов применительно к изучению процессов их разрушения // Метеоритика. 1985. Вып. 44. С. 105.
- Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. 3-е изд., М.: Недра, 1978. 390 с.
- Ballhaus C., Ellis D.J. Mobility of core melts during Earth's accretion// Earth and Planet. Sci. Lett. 1996. V. 143. P. 137.
- Bruhn D., Groebner N., Kohlstedt D.L. An interconnected network of core-forming melts produced by shear deformation // Nature. 2000. V. 403. P. 883.
- Burkhardt C., Dauphas N., Tang H., Fischer-Goedde M., Qin L., Chen J., Rout S., Pack A., Heck P., Papanastassiou D. In search of the Earth-forming reservoir: Mineralogical, chemical, and isotopic characterizations of the ungrouped achondrite NWA 5363/NWA 5400 and selected chondrites // Meteorit. and Planet. Sci. 2017. V. 52. № 5. P. 807.

- Cassiamani G., Kayzre J.D., Ferro R., Klotz U.E., Locaze J., Wollants P. Critical evaluation of the Fe–Ni, Fe–Ti, and Fe–Ni–Ti alloy systems // *Intermetallic*. 2006. V. 14. P. 1312.
- Ghosh A., Weidenschilling S.J., McSween H.Y. Importance of the accretion process in asteroid thermal evolution: 6 Hebe as an example // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2003. V. 38. P. 711.
- Groebner N., Kohlstedt D.L. Deformation-induced metal melt networks in silicates: Implications for core mantle interactions in planetary bodies // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 245. P. 571.
- Jarosewich E. Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses // *Meteorit. and Planet. Sci.* 1990. V. 25. P. 323.
- Henke S., Gail H.-P., Tieloff M., Schwarz W. H. Thermal evolution model for the H chondrite asteroid-instantaneous formation versus protracted accretion // *Icarus*. 2013. V. 226. P. 212.
- Hogan J.D., Kimberley J., Hazeli K., Plescia J., Ramesh K.T. Dynamic behavior of an ordinary chondrite: The effects of microstructure on strength, failure and fragmentation // *Icarus*. 2015. V. 260. P. 308.
- Huang E., Chen C.H., Huang T., Lin E.H., Ji-An Xu. Raman spectroscopic characteristics of Mg–Fe–Ca pyroxene // *American Mineralogist*. 2000. № 85. p. 473.
- Hutchison R. *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge Univ. Press, 2004.
- Jon M. Friedrich, Michael K. Weisberg, Mark L. Rivers. Multiple impact events recorded in the NWA 7298 H chondrite breccias and the dynamical evolution of an ordinary chondrite asteroid // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2014. № 394. P. 13.
- Krzesinska A., Fritz J. Weakly shocked and deformed CM microxenoliths in the Pułtusk H chondrite // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2014. V. 49. P. 595.
- Krzesinska A. Contribution of early impact events to metal-silicate separation, thermal annealing, and volatile redistribution: Evidence in the Pułtusk H chondrite // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2017. V. 52. P. 2305.
- Kuebler K.E., Jolliff B.L., Wang A., Haskin L.A. Extracting olivine (Fo–Fa) compositions from Raman spectral peak positions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. V. 70. P. 6201.
- Maneck A. Mineralogical and petrological study of the Pułtusk meteorite // *Mineralogical Transactions*. 1972. V.40. P. 53.
- Lorenz C.A. *Meteoritical Bulletin*. № 108. 2020.
<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?sea=NWA+12370&sfor=names&ants=&nwas=&falls=&valids=&stype=contains&lrec=50&map=ge&browse=&country=All&srt=name&categ=All&mblist=All&rect=&phot=&strewn=&snew=0&pnt=Normal%20table&code=69306>
- Miyamoto M., Fujii N., Takeda H. Ordinary chondrite parent body: An internal heating model // *Lunar Planet. Sci.* 1981. V. 12B. P. 1145.
- Mouri T., Enami M. Raman spectroscopic study of olivine-group minerals // *J. Mineralogical and Petrological Sci.* 2008. № 103. P. 100.
- Pouchou J.L., Pichoir F. Possibilites d'analyse en profondeur a la microsonde electronique // *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 1984. V. 9. P. 99.
- Stöffler D., Keil K., Scott E.R.D. Shock metamorphism in ordinary chondrites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. № 55. P. 3845.
- Tomkins A.G., Weinberg R.F., Sheaffer B.F., Langendam A. Disequilibrium melting and melt migration driven by impacts: Implications for rapid planetesimal core formation // *Geochimica et Cosmochim. Acta*. 2013. V. 100. P. 41.
- Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (A)*. 1988. V. 325. P. 535.
- Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites // *Meteorit. and Planet. Sci.* 1993. V. 28. P. 460.
- Yoshino T., Walter M.J., Katsura T. Core formation in planetesimals triggered by permeable flow // *Nature*. 2003. V. 422. P. 126.