

УДК 550.41, 523.3-1/-8, 523.41/.43

БОГАТЫЙ МЕТАЛЛОМ НЕСГРУППИРОВАННЫЙ ХОНДРИТ: NORTHWEST AFRICA 13202

© 2025 г. М. А. Иванова*, К. М. Рязанцев**,
С. Н. Теплякова***, Д. А. Садиленко****

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: meteorite2000@mail.ru; **ryazan-konst@rambler.ru*

****elga.meteorite@gmail.com; ****sadilenko@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.11.2024 г.

После доработки 18.02.2025 г.

Принята к публикации 07.03.2025 г.

Впервые в коллекции РАН был выявлен метеорит нового типа, NWA 13202. Он относится к богатым металлом несгруппированным хондритам и является парным с хондритами NWA 12379/12273. Эти хондриты в среднем содержат ~70 об. % Fe-Ni-металла, а оставшийся объем составляют хондры и мелкие силикатные включения, погруженные в металл. Тонкозернистая силикатная матрица, как и в других известных богатых металлом хондритах (G-, CH, CВa и CВb), отсутствует. Хондры представлены в основном порфиоровыми оливин-пироксеновыми, оливиновыми и пироксеновыми разновидностями (POP, OP и PP), непорфиоровые хондры (BO, SO, CC, RC, GC) встречаются редко. Оливин имеет L-хондритовый химический состав, $Fa_{25.9} \pm 3.5$ мол. %, а низко-Са-пироксен – $Fs_{17.2} \pm 5.7$ мол. %, ближе к H-хондритовому. По степени неравновесия состава оливина метеорит соответствует хондритам 3–4 петрологического типа. Аксессуарные минералы – фосфаты и хромит. Металл представлен низко-Ni камаситом и высоко-Ni тэнитом и тетратэнитом, из сульфидов наблюдался только троилит. Изотопный состав кислорода силикатов хондр этих несгруппированных хондритов подтверждает их принадлежность к изотопному резервуару кислорода LL-хондритов (Jansen et al., 2019). Металл испытал частичное плавление, и возраст его формирования ~2.4 млн лет после образования Са–Al-включений (Liu et al., 2023). Хондриты такого типа образовались, вероятно, в результате катастрофического столкновения металлического и хондритового тел. Столкновение не было настолько мощным и условия кристаллизации подходящими, чтобы сформировать хондры закалочной структуры, таких как CC- и SO-типы. После реакреции нового родительского тела богатого металлом несгруппированного хондрита вещество NWA 13202 и NWA 12379/12273 испытало воздействие водного флюида и метаморфизм при температуре ~600 °С, что привело к формированию фосфатов и кайм железистого оливина вокруг низко-Са-пироксена.

Ключевые слова: богатые металлом хондриты, порфиоровые и непорфиоровые хондры, катастрофическое ударное событие, реакреция, водные преобразования, флюид и термальный метаморфизм на родительском астероиде

DOI: 10.7868/S3034495625090019

ВВЕДЕНИЕ

Наши знания о процессах, которые предшествовали аккреции и образованию планет земной группы, постоянно увеличиваются за счет обнаружения новых уникальных образцов внеземного вещества – метеоритов и совершенствования методов анализа вещества. В настоящее время повышенное внимание уделяется процессам раннего

космохимического и геохимического фракционирования вещества в зарождающейся Солнечной системе, которые могли оказывать влияние на состав вещества, из которого аккретировали астероиды, Меркурий, Венера, Земля, Марс. Были установлены признаки химических реакций твердого вещества хондритов с газовой фазой протопланетного диска. В крупных бассейнах ударного расплава на поверхности родительских тел хондритов

наблюдалось фракционирование сидерофильных элементов. Было обнаружено фракционирование летучих элементов в высокотемпературных событиях в протопланетном диске и на родительских телах хондритов, а также ранний базальтовый вулканизм и дифференциация малых тел.

Актуальной задачей является изучение процессов обогащения хондритового вещества металлом и источников такого обогащения. Таким образом, очень важным является понимание процесса аккреции астероидов, богатых металлом. На данный момент до конца неизвестно, как аккретировали хондритовые тела, состоящие на 20–80 % из металла, и каковы были составляющие компоненты при аккреции таких тел, был ли исходный материал примитивным или уже фракционированным.

К богатым металлом хондритам относятся такие разновидности, содержание металла в которых превышает ~20 об. %, поскольку в известных обыкновенных (OC), энстатитовых (EC), наиболее восстановленных (HN) и низкожелезистых хондритах содержание металла варьирует в пределах 5–15 об. % (Russell et al., 1998; Troiano et al., 2011). В отличие от них, в G хондритах содержание металла составляет 23 об. % (Weisberg et al., 2015; Ivanova et al., 2020), в CH углистых хондритах ~22 об. % (Krot et al., 2002; Ivanova et al., 2008), а в CB углистых хондритах – от 25 до 70–80 об. % (Weisberg et al., 2001, Krot et al., 2002; Ivanova et al., 2022). Таким образом, к богатым металлом относятся G, CH, CB и CH/CB хондриты.

CB хондриты (бенкуббиниты) относятся к CR клану и делятся на CBa (крупнозернистые) и CBb (мелкозернистые) (Weisberg et al., 2001; Krot et al., 2002; 2017). Они состоят из химически зонального в CBb типе и незонального в CBa типе никелистого железа, непорфиновых (скелетных оливиновых SO и криптокристаллических (CC)) хондр, которые преобладают над порфировыми оливин-пироксеновыми. Хондры имеют узкий диапазон изотопного состава кислорода ($\Delta^{17}\text{O} \sim -2.5 \pm 0.5\text{‰}$), тугоплавкие включения, окруженные каймой Варка – Ловеринга (Wark, Lovering, 1977), обеднены ^{16}O ($\Delta^{17}\text{O}$ от -15‰ до -5‰). Хондриты CH-CB типа содержат гидратированные класты и лишены матрицы, которая типична для хондритов (Weisberg et al., 2001; Krot et al., 2002, 2017). Предполагается, что CB хондриты образовались в результате плавления, испарения и конденсации в облаке ударного пара, которое возникло в ходе крупномасштабных соударений астероидов примерно 4.5 миллиарда лет назад, вскоре после формирования тугоплавких включений (CAIs) CV3 хондритов с каноническим $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ отношением, самых древних твердых образований Солнечной

системы (Rubin et al., 2003; Krot et al., 2005, Connely et al., 2012; Bollard et al., 2015; Weyrauch et al., 2018). Некоторые из соударяющихся астероидов могли быть уже дифференцированными, как было показано в публикациях (Fedkin et al., 2015; Oulton et al., 2016; Ivanova et al., 2022; Lorenz et al., 2023; Krot et al., 2023). Известен только один бенкуббинит, содержащий ударную литологию, Quebrada Chimborazo 001, данные по которому представлены в работе (Koch et al., 2019).

CH хондриты, так же как и CB хондриты, не имеют тонкозернистой матрицы. Они состоят в основном из равных соотношений вещества CB хондритов и обычных хондритовых компонентов (Kimura et al., 1993; Weber et al., 1995; Ivanova et al., 2008; Иванова, Петаев, 2015; Krot et al., 2008, 2010, 2012). Эти компоненты включают магнезиальные, железистые и богатые Al порфировые хондры, изотопный состав кислорода которых варьирует в широком диапазоне ($\Delta^{17}\text{O} = \text{от } -5\text{‰}$ до $+4\text{‰}$), и тугоплавкие включения, окруженные каймой Варка – Ловеринга, которая характеризуется солнечным изотопным составом кислорода, богатым ^{16}O , и имеет $\Delta^{17}\text{O} = -24\text{‰}$. Крот и др. (Krot et al., 2008, 2010, 2012) предположили, что CB и CH хондриты генетически связаны и являются разными образцами хондритовых компонентов, образованных как в ударном, так и в небулярном процессе, и могут представлять единый родительский астероид. Вайсберг и др. (1995) на основании химического и изотопного сходства CR, CH и CB хондритов предложил объединить их в единый CR-клан метеоритов. Согласно этой работе, метеориты CR-клана сформировались в одно и то же время и примерно на одном и том же гелиоцентрическом расстоянии, за «снеговой линией», на расстоянии примерно 3–4 астрономических единиц от Солнца.

Метеорит Ишеево (CH/CB) имеет характеристики как CH, так и CB хондритов (Ivanova et al., 2008). Известно, что CH/CB-хондриты содержат самый тяжелый азот ($\delta^{15}\text{N} = -1122\text{‰}$), как и все другие CB хондриты, а их углерод обогащен тяжелым изотопом. Ишеево имеет древний K-Ar возраст, но нельзя исключить, что последующие ударные события повлияли на это значение. Возраст экспозиции (CRE), определенный по космогенному ^{38}Ar , 34 млн лет, соответствует возрасту бенкуббинитов CBa-группы (Ivanova et al., 2008).

Всего известно три богатых металлом G хондрита: Northwest Africa (NWA) 5492, Grosvenor Mountains (GRO) 95551 (Weisberg et al., 2015) и Sierra Gorda 009 (Ivanova et al., 2020). Они состоят из силикатных хондр крайне восстановленного состава, их фрагментов, никелистого железа и сульфидов

(22 об. %), тонкозернистая матрица отсутствует. G хондриты не связаны с CR-SH-SB хондритами в отношении валового изотопного состава O, C и N, минералогии и геохимии. Они не имеют характерных для SH-SB-хондритов фрагментов матрицы, содержащих гидратированный материал. Средний состав металла G хондритов аналогичен составу H хондритов. Изотопный состав кислорода G хондритов ($\Delta^{17}\text{O} > 0\text{‰}$) находится в интервале значений между энстатитовыми (E) и обыкновенными (O) хондритами. Валовый изотопный состав углерода и азота SG 009 соответствует E и O хондритам. Изотопный состав неона отражает смесь космогенных и солнечных компонентов, а возраст воздействия космических лучей SG 009 типичен для хондритов O, E и R (румуритов). G хондриты могут представлять уникальных богатых металлами родительский астероид, содержащий примитивный и фракционированный материал внутренней части Солнечной системы (Ivanova et al., 2020).

Недавно были обнаружены несгруппированные богатые металлом (~64 об. %) хондриты Northwest Africa (NWA) 12379/12273, силикатная часть которых представлена хондрами и их обломками (Agee et al., 2019; Jansen et al., 2019). Эти метеориты являются наиболее загадочными образованиями Солнечной системы. Происхождение и генетические взаимосвязи G хондритов с другими типами метеоритов неясны, а выводы об особенностях и условиях формирования их компонентов остаются дискуссионными. В настоящей работе приводятся результаты минералого-петрографического исследования богатого металлом метеорита, недавно появившегося в метеоритной коллекции РАН. Northwest Africa 13202 (NWA 13202) был недавно найден в пустыне Западной Сахары и является парным метеоритам NWA 12379/12273. В данной статье характеристики этого метеорита сравниваются с таковыми других богатых металлом хондритов и обсуждается история происхождения и эволюции его вещества.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Два шлифа NWA 13202 общей площадью ~4 см² были исследованы с помощью оптического микроскопа (Leica DMRX) в отраженном свете, а затем с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 с энергодисперсионной приставкой (EDS) Oxford Instruments UltiMAX 100 в ГЕОХИ РАН. Изображения высокого разрешения, картирование в рентгеновских лучах K α главных элементов и элементов-примесей и EDS анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда ~1 нА. Для EDS анализа использовался набор стандартов, широко применяемый в ми-

кроанализе. Поскольку для микроанализа использовались данные только энерго-дисперсионного анализа, то в работе обсуждаются только те элементы минералов, концентрации которых надежно определялись в серии анализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Петрографо-минералогическая характеристика NWA 13202

Новый метеорит NWA 13202 состоит из металла ~70 об. %, хондр и мелких силикатных включений в металле ~26 об. %, (рис. 1, 2а, б). Оставшиеся ~4 об. % – это хромит, троилит и фосфаты. По изображениям, построенным в рентгеновских лучах различных элементов, определено, что метеорит содержит примерно 4 об. % оксидов, сульфидов и фосфатов (рис. 2б). Тонкозернистая матрица, характерная для типичных хондритов, полностью отсутствует. Тугоплавких Ca,Al-включений в шлифах обнаружено не было.

Хондры представлены в основном оливин-пироксеновыми (POP) (рис. 3а), пироксеновыми (PP) и оливиновыми (OP) порфирированными разновидностями. Средний размер хондр составляет ~450 мкм, изредка встречаются более мелкие (0.1 мм) и крупные (1.5 мм) объекты. Непорфирированные (балочные оливиновые) (BO) (рис. 3б), пироксеновые радиально-лучистые (PR), крипнокристаллические

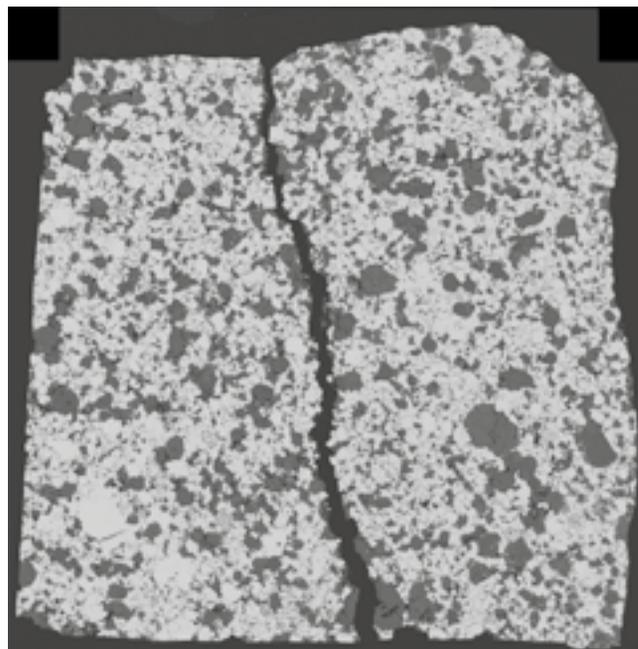


Рис. 1. Изображение в обратно рассеянных электронных лучах богатого металлом несгруппированного хондрита NWA 13202. Металл показан белым цветом, силикаты – серым. Ширина изображения 2.5 см.

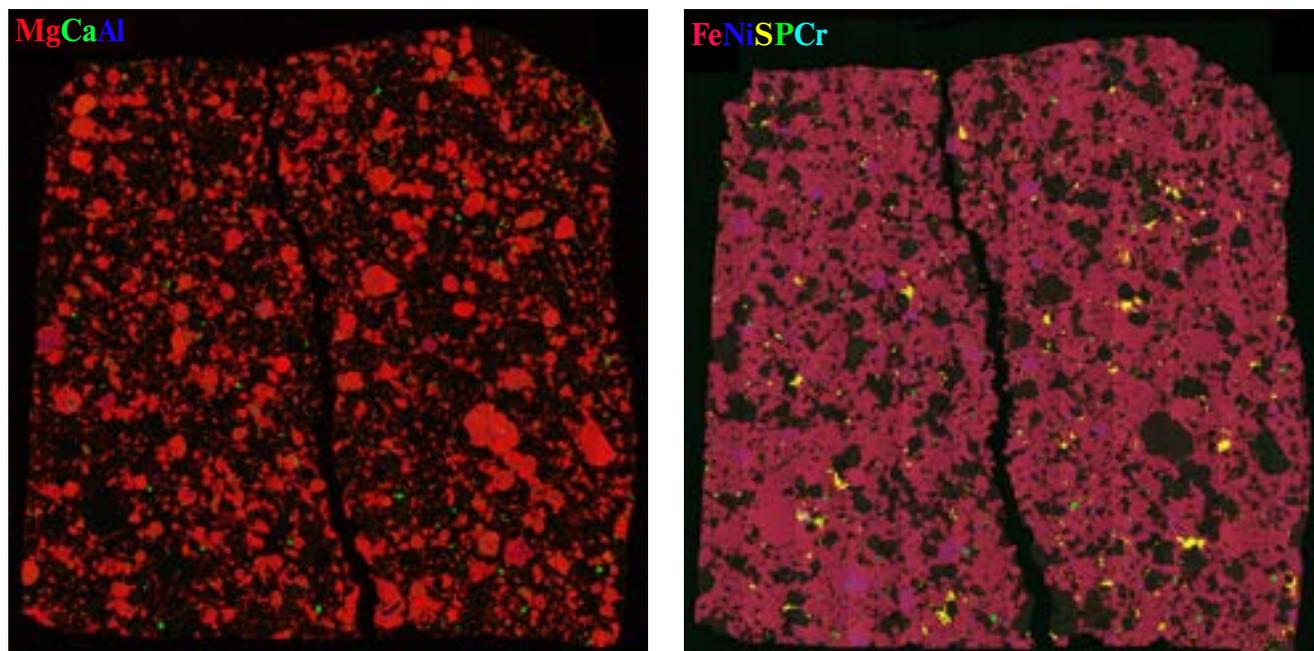


Рис. 2. Изображения в рентгеновских лучах К α : Mg – красный, Ca – зеленый, Al – синий (левый); Fe – красный, Ni – синий, S – желтый, P – зеленый, Cr – голубой (правый) богатого металлом негруппированного хондрита NWA 13202. Ширина изображений 2.5 см.

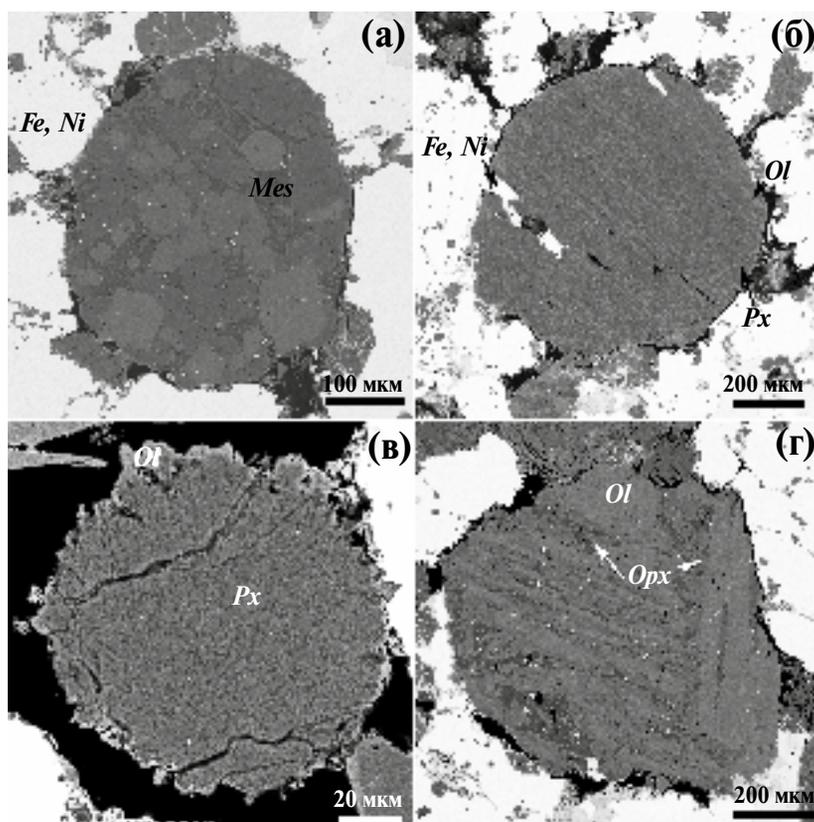


Рис. 3. Изображение в обратно-рассеянных электронах хондр из метеорита NWA 13202: (а) порфировая оливин-пироксеновая хондра в Fe-Ni-металле; (б) балочная оливин-пироксеновая хондра с включениями Fe-Ni-металла; (в) пироксеновая мелкозернистая хондра с оливиновой каймой; (г) оливин-пироксеновая порфировая хондра, низко-Са пироксен окаймляет кристаллы оливина. Условные обозначения: *Ol* – оливин, *Orx* и *Px* – низко-Са пироксен, *Mes* – мезостазис, *Fe, Ni* – Fe-Ni-металл.

ские (CC), зернистые (GC) (рис. 3в) и скелетные оливиновые (SO) хондры редки по сравнению с порфиристыми хондрами. Во многих оливин-пироксеновых порфиристых хондрах оливин обрастает низко-Са-пироксеном (рис. 3г), а также оливин и низко-Са пироксен обрастают высоко-Са пироксеном (рис. 4а). Оливин и низко-Са пироксен в хондрах и во включениях в металле зональные (рис. 4б, в). На изображениях в обратно-рассеянных электронах видно, что центральная часть зерен оливина и низко-Са пироксена более магниезная, чем периферийная часть. Низко-Са пироксен, находящийся в некоторых порфиристых хондрах, а также в мелких включениях в Fe-Ni-металле, повсеместно окружен оболочкой оливина (рис. 4г). Размер силикатных включений в металле не превышает 110 мкм.

Мезостази́с в хондрах представляет собой тонкозернистую смесь пироксена и стекла (рис. 4а). Нераскристаллизованное стекло наблюдалось в мелких силикатных включениях в металле и в хондрах.

Металлические зерна в NWA 13202 имеют размер 100–450 мкм, а металлические и сульфидные включения в хондрах – менее 15 мкм. Некоторые металлические частицы, наряду с низко-Ni металлом, камаситом, содержат высоко-Ni фазы, тэнит и тетраэтит (рис. 5а), которые обычно встречаются в виде мелких зерен (< 40 мкм) на границе между силикатами и троилитом, а также в интерстициях между камаситом. Троилит находится в виде включений в камасите (рис. 5а) и в виде изолированных зерен. Часто металл и троилит неправильной угловатой формы заполняет пространство между силикатными включениями. Мелкие силикатные включения в металле, возможно, представляют обломки хондр, а также агрегаты, состоящие из оливина, низко-Са пироксена, хромита и фосфата. Хромит в виде идиоморфных и ксеноморфных кристаллов встречается в металле и вдоль границ с силикатными хондрами. Фосфаты представлены округлыми образованиями, размером примерно 10 мкм, и также встречаются в Fe-Ni-металле и в приграничной части хондр.

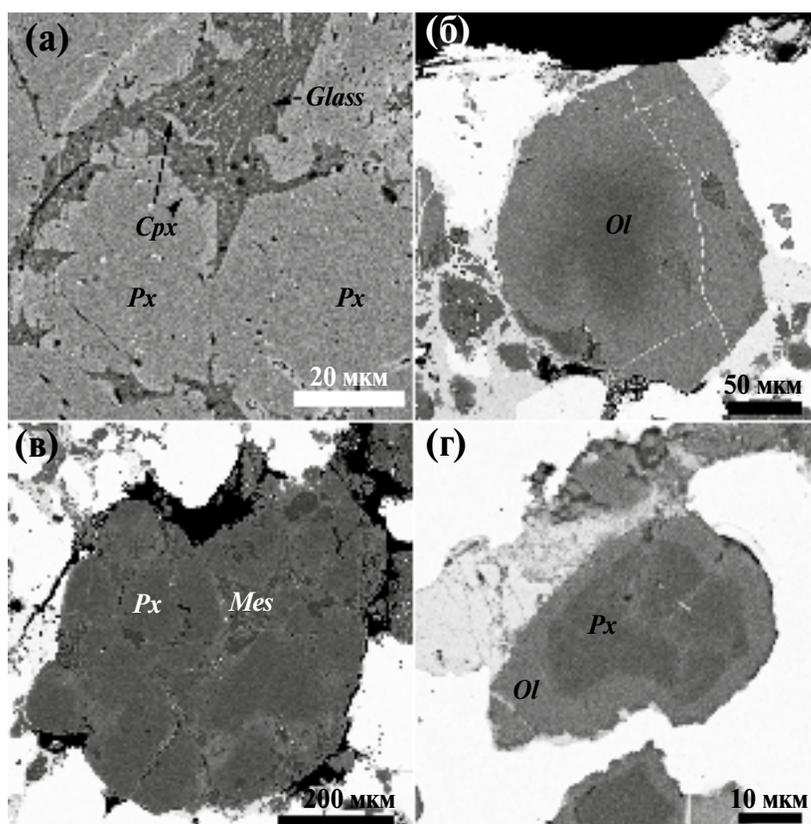


Рис. 4. Изображения в обратно-рассеянных электронах фрагментов хондр и силикатных включений в хондрите NWA 13202: (а) фрагмент порфиристой пироксеновой хондры, низко-Са пироксен обрастает высоко-Са пироксеном, мезостази́с представлен мелкораскристаллизованной смесью стекла и высоко-Са пироксена; (б) включение зонального оливина в металле; (в) порфиристая пироксеновая хондра с зональными кристаллами низко-Са пироксена; (г) включения в металле низко-Са пироксена, окруженные железистым оливином. Условные обозначения: *Ol* – оливин, *Px* – низко-Са пироксен, *Cpx* – высоко-Са пироксен, *Mes* – мезостази́с, *Glass* – стекло.

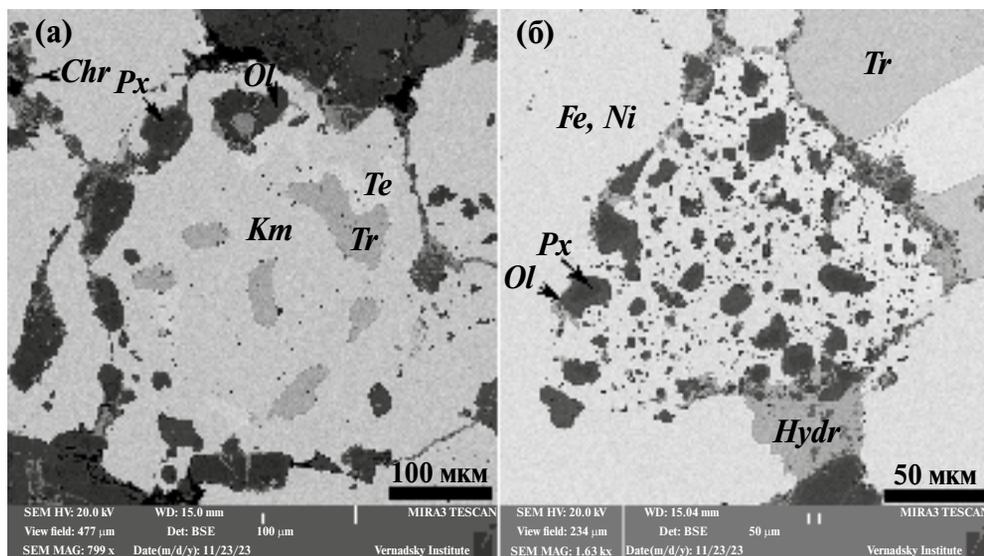


Рис. 5. Изображения в обратно-рассеянных электронах металлической составляющей хондрита NWA 13202: (а) Fe-Ni-металл, представленный низко-Ni камаситом и высоко-Ni тэнитом с включениями троилита, силикатов и хромита; (б) фрагмент смеси Fe-Ni-металла с силикатными включениями. Продукты выветривания – обычно гидроокислы железа. Условные обозначения: *Chr* – хромит, *Ol* – оливин, *Px* – низко-Са пироксен, *Km* – низко-Ni-металл, *Te* – высоко-Ni-металл, *Tr* – троилит, *Hydr* – гидроокислы железа, *Fe, Ni* – Fe-Ni-металл.

Вдоль границ силикатных объектов и металла, а также в трещинах наблюдалось незначительное количество продуктов земного выветривания в виде кайм гидроксидов железа, что позволяет оценить степень земного выветривания метеорита как низкую, относящуюся к стадиям W1-W2 (Wlotzka, 1993). В образце отмечались признаки ударного воздействия в виде тонкозернистой смеси металла и силиката (рис. 5б), однако оценить степень ударного воздействия по имеющемуся аншлифу невозможно.

Химический состав минералов NWA 13202

Как уже было отмечено выше, металл в NWA 13202 представлен низко-Ni разновидностью – камаситом, и высоко-Ni минералами – тэнитом и тетратэнитом. Средние содержания Ni в минералах (мас. %): камасит – 7.04, тэнит – 16.1, тетратэнит – 43.2. Троилит является практически чистым FeS и не содержит Ni и другие элементы.

Химические составы оливина, пироксена, стекла в мезостазице хондр и хромита представлены в табл. 1. Химический состав оливина (табл. 1, рис. 6) варьирует в широких пределах, и величина стандартного отклонения, характеризующая степень неоднородности состава, составляет 10 %. Особенно заметно изменяется состав оливина в зональных кристаллах порфириковых оливин-пироксеновых хондр, в центре кристалла состав более магниезильный по сравнению с краевыми участками. Оливин, находящийся в виде неболь-

ших включений в металле, а также окружающий низко-Са-пироксеновые включения, более однородный по составу (табл. 1).

Пироксен в NWA 13202 представлен низко-Са и высоко-Са разновидностями. Состав низко-Са пироксена варьирует в широких пределах (табл. 1). Зональные кристаллы, в основном в оливин-пироксеновых и пироксеновых хондрах, значительно варьируют по составу. Центральная их область является наиболее магниезильной по сравнению с краевыми участками. Высоко-Са пироксен представлен пижонитом и авгитом (табл. 1).

Хромит обогащен Al_2O_3 , MgO и TiO_2 , содержание V_2O_5 и ZnO составляет <1 мас. %, и его состав не зависит от размера зерен. Фосфаты представлены апатитом и меррилитом.

Мезостазиc в хондрах, который в некоторых объектах представляет собой раскристаллизованную тонкозернистую смесь стекла плагиоклазового состава и Са-пироксена, несколько варьирует по содержанию Na и K (табл. 1). В основном отмечается альбитовый состав, но встречаются и обогащенные калием участки в мезостазице. Наиболее обогащенное калием стекло наблюдалось в небольшом включении с оливином в металле NWA 13202. Содержание ортоклазовой компоненты (*Ort*) в составе стекла доходило до 11.7 мол. % при *Ab*79.5 мол. %.

Таблица 1. Средние и представительные анализы минералов метеорита NWA 13202 (мас. %)

Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Fa	Fs	Wo	Fe/ Mn	Ab	Or
Оливин (39)	37.5 ±0.7	н.о. —	н.о. —	0.05 ±0.04	23.4 ±3.0	0.45 ±0.05	37.6 ±2.4	0.05 ±0.05	н.о. —	н.о. —	99.05	25.9 ±3.5	—	—	52.0 ±6.3	—	—
Оливин вокруг Включений в металле (8)	37.1 ±0.8	н.о. —	н.о. —	0.10 ±0.06	24.8 ±1.3	0.45 ±0.02	36.3 ±1.1	0.15 ±0.06	н.о. —	н.о. —	—	27.7 ±1.6	—	—	53.3 ±3.3	—	—
Оливин, центр	39.9	н.о.	н.о.	0.03	10.7	0.38	48.3	0.03	н.о.	н.о.	99.28	11.0	—	—	27.7	—	—
Оливин, край	37.3	н.о.	н.о.	0.03	25.4	0.47	36.3	0.07	н.о.	н.о.	99.57	28.2	—	—	53.4	—	—
Низко-Са- пироксен (28)	55.7 ±1.3	0.10 ±0.06	0.28 ±0.29	0.46 ±0.51	11.0 ±3.4	0.49 ±0.07	30.9 ±2.9	0.50 ±0.31	н.о. н.о.	н.о. н.о.	99.43	—	17.2	±0.64	22.3 ±6.7	—	—
Низко-Са- пироксен, центр	56.6	н.о.	0.09	0.63	8.99	н.о.	32.0	0.31	н.о.	н.о.	98.56	—	14.2	0.59	18.9	—	—
Низко-Са- пироксен, край	51.9	0.06	0.96	0.75	23.0	0.45	19.8	1.51	н.о.	н.о.	98.42	—	38.7	3.19	50.5	—	—
Пижонит	56.4	0.33	2.8	1.5	5.39	1.15	24.0	7.03	1.01	0.05	99.64	—	11.3	15.5	4.63	—	—
Авгит (6)	52.6 ±1.8	0.46 ±0.18	2.81 ±1.36	2.02 ±0.52	4.75 ±0.67	0.56 ±0.25	18.2 ±2.56	16.4 ±3.9	0.78 ±0.14	0.06 ±0.02	98.67	—	8.66	39.2	10.0 ±3.6	—	—
Стекло в мезостазице (16)	62.2	0.42	18.9	0.56	1.82	0.18	2.85	2.35	9.58	0.64	99.50	—	—	—	—	85.1	3.37
Стекло во включении	±4.5	±0.31	±3.0	±0.33	±1.08	±0.01	±1.69	±1.65	±1.57	±0.72	—	—	—	—	—	±7.9	±2.91
Хромит	48.5	н.о.	28.9	1.28	2.44	н.о.	1.02	2.75	13.8	3.08	101.8	—	—	—	—	79.5	11.7
Хромит	н.о.	1.81	4.9	59.1	30.7	н.о.	2.41	н.о.	н.о.	н.о.	98.89	—	—	—	—	—	—

Примечания. В скобках показано количество анализов для определения среднего значения; ± — стандартное отклонение. Fa, Fs, Wo, Ab и Or (мол. %); Fe/Mn (ат.); н.о. — не определялось.

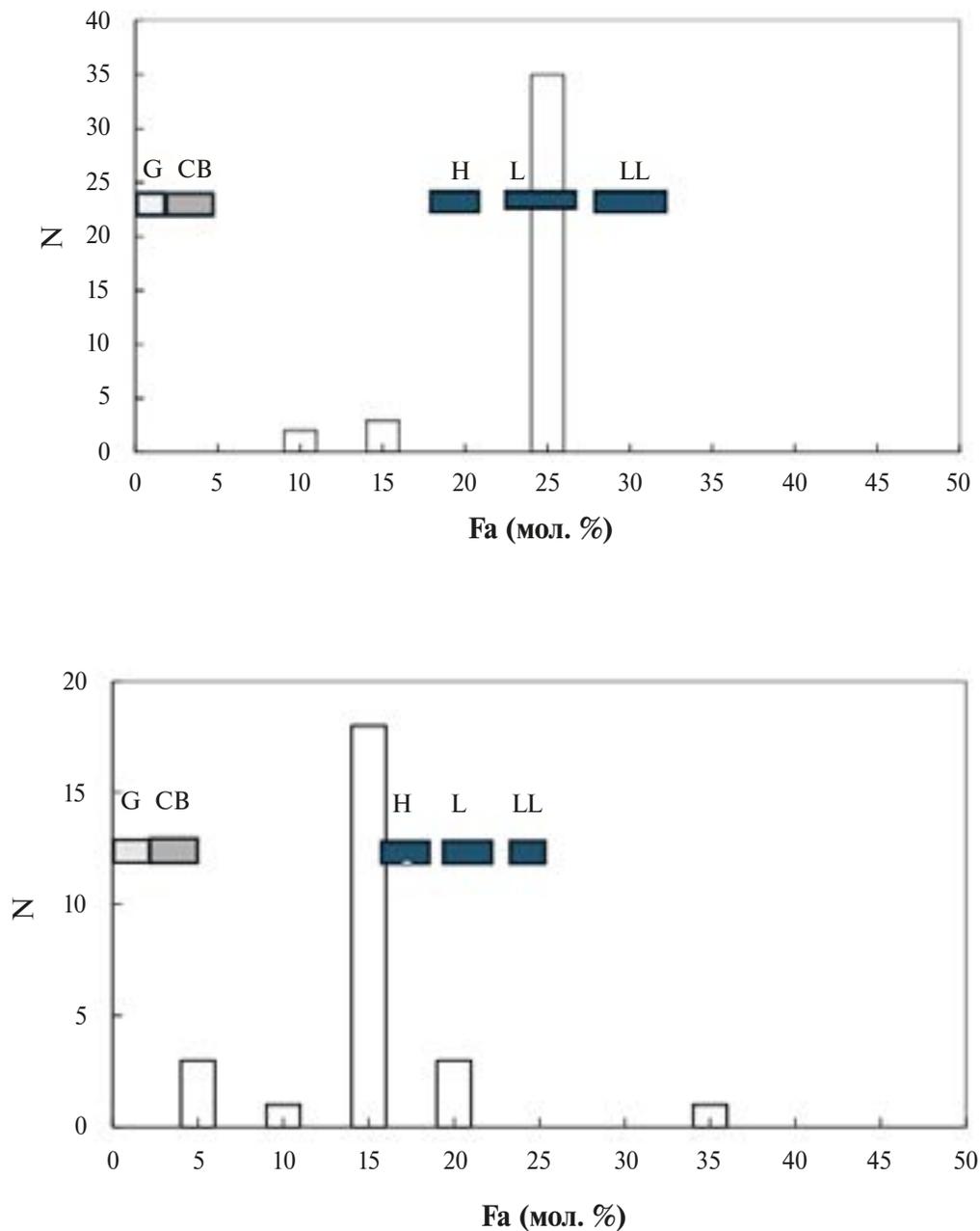


Рис. 6. Состав оливина (Fa) (верхний график) и низко-Са пироксена (Fs) (нижний график) в богатом металлом несгруппированном хондрите NWA 13202 по сравнению с G (Weisberg et al., 2015; Ivanova et al., 2020), CB хондритами (Weisberg et al., 2001; Ivanova et al., 2022) и обыкновенными хондритами H, L и LL групп (Jones, 1998; Scott, Krot, 2014). N – число анализов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Новый метеорит NWA 13202 является парным с NWA 12379/12273, которые классифицированы как несгруппированные богатые металлом хондриты (Gattassesa et al., 2021). Петрографо-минералогические характеристики, структура и состав минералов NWA 13202 очень близки к таковым метеоритов NWA 12379/12273 (Agee et al., 2019;

Jansen et al., 2019), и эти метеориты имеют ряд особенностей, которые выделяют их среди известных богатых металлом хондритов G, CH, CВa и CВb типов. Принадлежность NWA 13202 к хондритовым метеоритам, богатым металлом, не вызывает сомнения: содержание металла в NWA 13202 ~70 об. %, примерно такое же, как и в NWA 12379/12273, а силикаты представлены хондрами и их фрагментами.

Тонкозернистая матрица в межхондровом пространстве отсутствует во всех трех метеоритах. По размеру хондр NWA 13202 (450 мкм) больше соответствует L хондритам, чем H хондритам (Scott, Krot, 2014), но не сильно отличается от NWA 12379/12273 хондритов (~400 мкм).

Акцессорные хромит и фосфат часто встречаются в обыкновенных хондритах. Однако хромитовых хондр и включений, которые встречаются в матрице обыкновенных хондритов (Krot et al., 1993; Ivanova, Krot, 1994) и были также обнаружены в NWA 12379 (Jansen et al., 2019), в NWA 13202 найдено не было. Так же как и в парных NWA 12379/12273 хондритах, в NWA 13202 отсутствуют богатые Al хондры и тугоплавкие Ca–Al-включения, которые часто встречаются в углистых и G хондритах (Ivanova et al., 2020). В обыкновенных хондритах они редки (MacPherson, 2014).

Средние составы оливина ($Fa_{25.9}$) NWA 13202 находятся в диапазоне значений L хондритов, а низко-Ca пироксена ($Fs_{17.2}$) – в интервале значений, близких к H-хондритам (рис. 6) (Jones, 1998). Средняя величина значений Fe/Mn отношения низко-Ca пироксена (22) также находится в пределах значений H-хондритов. Похожие составы минералов характерны и для NWA 12379/12273. По степени неоднородности составов оливина и пироксена вещество относится к неравновесному типу, между петрологическими типами 3 и 4 по классификации обыкновенных хондритов (Grossman, Brearley, 2005; Huss et al., 2006). Величина стандартного отклонения мольной доли Fa в оливине в равновесных обыкновенных хондритах не превышает 5 %, а для оливинов NWA 13202 она составляет 10 %, что является признаком неравновесия составов оливина. Присутствие стекла в некоторых хондрах и мелких включениях в металле также указывает на неравновесие и отсутствие существенного термального метаморфизма. Интересно отметить, что оливин, образующийся в виде кайм вокруг низко-Ca пироксена в металле, (рис. 4г) имеет более однородный и более равновесный состав, чем оливин хондр: $Fa_{27.7} \pm 1.6$ мол. %.

Поскольку минералого-петрографические характеристики трех метеоритов – NWA 13202 и NWA 12379/12273 – очень похожи, можно предположить, что эти парные метеориты, возможно, сформировались в одном резервуаре с однородным изотопным составом кислорода. Изотопные составы кислорода силикатов NWA 12379/12273, приведенные в (Jansen et al., 2019, рис. 7), свидетельствуют о принадлежности вещества метеоритов к обыкновенным хондритам. Было показано, что на трехизотопной диаграмме кислорода ($\delta^{17}O$ vs. $\delta^{18}O$) оливин и низкокальциевый пироксен имеют узкий

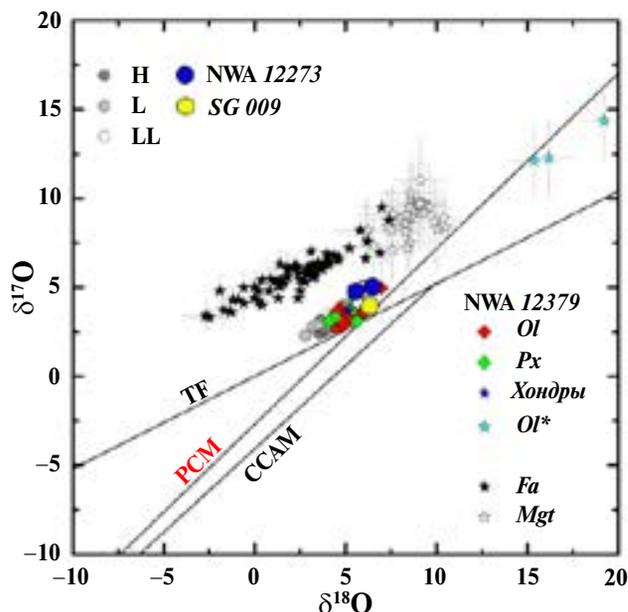


Рис. 7. Изотопный состав кислорода оливина (Ol) и пироксена хондр (Px), вторичного оливина (Ol^*) из кайм вокруг низко-Ca-пироксена, а также валовый изотопный состав кислорода хондр богатых металлом несгруппированных хондритов NWA 12379 (Jansen et al., 2019) и NWA 12273 (Agee et al., 2019), парных с NWA 13202. Для сравнения показаны изотопные составы кислорода H, L, LL и G хондритов (SG 009), (Ivanova et al., 2020), а также фаялита (Fa) и магнетита (Mgt) из неравновесных обыкновенных хондритов (Doyle et al., 2015). TF – линия земного масс-фракционирования, CCAM – линия фракционирования безводных минералов углистых хондритов, PCM – линия фракционирования минералов примитивных хондр.

диапазон значений, немного выше линии земного фракционирования. Эти значения и валовый изотопный состав кислорода хондр находятся в диапазоне значений обыкновенных хондритов (Clayton et al., 1991), а также оливина и низко-Ca пироксена хондр неравновесных обыкновенных хондритов (Kita et al., 2010). Валовый изотопный состав кислорода NWA 12379, определенный в двух пробах методом лазерного фторирования (Agee et al., 2019), в целом совпадает с результатами анализа *in situ* оливина и пироксена, полученными Jansen et al. (2019): $\delta^{18}O = 5.258, 5.613$ ‰; $\delta^{17}O = 3.939, 3.971$ ‰, $\Delta^{17}O = 1.163, 1.007$ ‰. Эти составы также находятся в области значений LL-хондритов.

На основании вышесказанного можно предполагать, что вещество обсуждаемых метеоритов по химическому составу минералов и изотопному составу кислорода не имеет ничего общего с веществом G и CH, CVa/CVb хондритов, магнетизальность силикатов которых крайне высока (в G, CVa/CVb хондритах) или преобладает над

железистыми объектами (в СН хондритах). В отличие от СН и СВa/СВb хондритов, в NWA 13202 практически отсутствуют непорфиновые хондры (SO и СС типа), а изотопный состав кислорода резко отличается и имеет сходство с изотопным составом обыкновенных хондритов. Как G и СВa хондриты, метеориты NWA 13202 и парные с ним не содержат тугоплавких Са,Al-включений, однако, в отличие от G, СН и СВa/СВb, они также не содержат богатых Al хондр, отсутствие которых наиболее типично для обыкновенных хондритов.

Таким образом, изученный метеорит NWA 13202 и парные с ним NWA 12379/12273 метеориты являются богатыми металлом хондритами, силикатная часть которых имеет сходство с неравновесными L3–4 хондритами. Поскольку эти хондриты содержат очень большое количество металла и у них отсутствует тонкозернистая матрица в межхондровом пространстве, то отнести эти метеориты к обыкновенным хондритам нельзя, на сегодняшний момент подтверждая их статус несгруппированных, богатых металлом хондритов.

*Формирование богатых металлом
несгруппированных хондритов NWA 13202
и NWA 12379/12273*

Отсутствие тонкозернистой матрицы и высокое содержание металла в несгруппированном богатом металлом хондрите NWA 13202 и парных с ним метеоритах NWA 12379/12273 позволяют предположить механизм их образования подобный тому, который принимается для СН/СВ хондритов. В последнее время наиболее популярна гипотеза о том, что СН-СВ хондриты, а возможно, и G хондриты, сформировались в результате смешения небулярных продуктов с веществом, образованным в облаке ударного пара (плюме) в результате катастрофических ударных событий примитивных и дифференцированных родительских тел и вторичной аккреции (например, Kallemeyn et al., 1978; Wasson, Kallemeyn, 1990; Petaev et al., 2001; Campbell et al., 2002; Krot et al., 2005, 2021; Fedkin et al., 2015; Oulton et al., 2016; Koefoed et al., 2022, Ivanova et al., 2022, Lorenz et al., 2023). В соударении могли участвовать как металлические, так и примитивные тела (Fedkin et al., 2015; Ivanova et al., 2022; Lorenz et al., 2023). Было показано, что аккреция и дифференциация родительских тел некоторых железных метеоритов магматической группы происходили очень рано, спустя ~1 млн лет после образования CAIs (Kleine et al., 2009), а хондры H хондритов формировались спустя 1.7 млн лет после CAIs, одновременно с хондрами L и LL хондритов (Kleine et al., 2009).

Однако среди хондр NWA 13202 нет следов формирования закалочных структур, таких как скелетные оливиновые (SO) и крипнокристаллические (CC) хондры, которые образуются в плюме и имеют более молодой возраст (Krot et al., 2005). Возможно, интенсивность ударных событий при столкновении металлического и хондритового тела не была столько велика, чтобы привести к условиям в облаке ударного пара, пригодным для образования SO и CC хондр с закалочной структурой. Например, в аномальных хондритах Fountain Hills (Lauretta et al., 2009; Krot et al., 2023) и Sierra Gorda 013 (Ivanova et al., 2022; Lorenz et al., 2023; Krot et al., 2023), помимо SO хондр, присутствовали хондроподобные порфиновые оливин-пироксеновые объекты, что свидетельствует об их формировании на периферии плюма, а не в центральной, наиболее горячей, его части. Возможно, и в случае с NWA 13202 и NWA 12379/12273 имело место событие, по интенсивности и мощности уступающее таковым при образовании СН, СВa и СВb хондритов, предположительно, из-за разных скоростей соударяющихся тел и другого угла столкновения. В результате соударение привело к смешению металла и непереплавленных хондр.

Однако на данный момент неизвестно, из одного ли изотопного резервуара формировался металл и силикатная часть несгруппированных богатых металлом хондритов, таких как NWA 13202. По данным изотопного состава кислорода парных с NWA 13202 хондритов можно предположить, что силикатная часть хондрита формировалась во внутренней части Солнечной системы и относится к «неуглистым метеоритам» (NC). В соответствии с принципом изотопной дихотомии первичного вещества, метеориты подразделяются на углистые (CC) и неуглистые (NC) в зависимости от того, формировались ли они до «снежной линии» (~3 АЕ от Солнца) или за ее пределами (Warren, 2011; Kruijer et al., 2017). Для того, чтобы отнести NWA 13202 и парных NWA 12379/12273 к углистым или неуглистым метеоритам, следует проанализировать изотопный состав Cr, Ti, Mo, Ni и Fe силикатной и металлической составляющих. Это позволило бы уточнить место и время их происхождения, так как эти изотопы являются маркерами области формирования их фаз-носителей (Trinquier et al., 2009; Warren 2011; Budde et al., 2016; Cook, Schönбächler, 2017; van Kooten et al., 2016; Nanne et al., 2019).

Исследование сидерофильных элементов металла NWA 12273 (Liu et al., 2023), парного с NWA 13202, показало, что фракционирование тугоплавких сидерофильных элементов камасита связано с частичным плавлением металла, содержащего ~3.9 мас. % S. Анализ фракций металла NWA 12273 позволил определить модельный Hf-W возраст

~2.4 млн лет после образования Ca,Al-включений (Connelly et al., 2012), то есть металл NWA 12273 образовался раньше, чем металл большинства Н хондритов и железных метеоритов группы ПЕ. Авторы работы (Liu et al., 2023) предположили на основании составов хондритов и «немагматических» железных метеоритов, что распределение сидерофильных элементов NWA 12272 свидетельствует об образовании металла NWA 12273 из исходного вещества, похожего по составу на металл Н хондритов и железных метеоритов ПЕ, и/или что его аккреция происходила в небулярном резервуаре, соседнем с таковым Н хондритов и железных метеоритов группы ПЕ.

Признаки водных и термальных преобразований на родительском теле NWA 13202. В NWA 13202, как и в парных ему NWA 12379/12273, в Fe-Ni-металле, наблюдалось большое количество мелких силикатных включений, состоящих из низко-Са пироксена, окруженного железистым оливином ($\text{Fa}_{27.7} \pm 1.6$ мол. %). В некоторых порфириновых хондрах также наблюдались подобные каймы вокруг низко-Са пироксена. Среди аксессуарных фаз были отмечены фосфаты (апатит и мериллит).

Эти наблюдения могут свидетельствовать о термальном метаморфизме с участием флюида на родительском теле богатых металлом несгруппированных хондритов. Формирование каймы железистого оливина вокруг низко-Са пироксена можно представить в виде реакции пироксена с водой, в которой растворены ионы Fe^{2+} и Mg^{2+} : $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3 + \text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{H}_2\text{O} = (\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4 + 2\text{H}^+$.

Авторы работ (Jones et al. 2014) и (Lewis and Jones 2018) изучали появление фосфатов в метаморфизованных обыкновенных хондритах. Они предположили, что фосфаты образуются при термальном метаморфизме ответственного за окисление фосфора, растворенного в металле. Фосфаты в NWA 13202 также могли образоваться подобным образом на родительском теле хондрита.

Вторичный железистый оливин, окружающий и замещающий низко-Са пироксен в парных с NWA 13202 метеоритах, имеет высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ (15.4–19.2 ‰) (Jansen et al., 2019). Его изотопный состав располагается значительно выше линии земного масс-фракционирования на трехизотопной диаграмме кислорода, на продолжении линии масс-фракционирования с $\Delta^{17}\text{O} \sim 4\%$ (рис. 7), определенной для фаялита и магнетита, образованных в результате воздействия водного флюида на родительских телах неравновесных обыкновенных хондритов (Doyle et al., 2015).

Таким образом, можно предположить, что рассматриваемые богатые металлом несгруппированные хондриты – NWA 13202 и NWA 12379/12273 – могли образоваться в результате реаккреции после катастрофического соударения дифференцированного металлического тела или его части с хондритовым родительским телом. Возраст образования металла NWA 12273 ~2.4 млн лет после Ca,Al-включений, и, возможно, он формировался в небулярном резервуаре, соседнем с таковым Н хондритов и железных метеоритов группы ПЕ (Liu et al., 2023). После смешения хондритового вещества с металлом они испытали изменения с участием водного флюида и термальный метаморфизм, причем водные изменения происходили до метаморфизма, так как в противном случае не сохранились бы признаки неравновесия составов оливина в хондрах этих метеоритов. Степень метаморфизма соответствовала 3–4 петрологическому типу обыкновенных хондритов, по оценке Лиу с соавторами – 3.8 (Liu et al., 2023), температурные воздействия не превышали ~540–620 °С (Anand et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый хондрит NWA 13202 является парным с хондритами NWA 12379/12273 и относится к богатому металлом несгруппированным хондритам. Следует отметить, что вещество метеорита такого типа впервые появилось в метеоритной коллекции РАН и в других всемирно известных метеоритных коллекциях.

NWA 13202 содержит ~70 об. % Fe-Ni-металла и силикатную составляющую (~26 об. %). Метеорит не содержит тонкозернистой матрицы. Силикатная составляющая представлена хондрами, в основном порфириновыми оливин-пироксеновыми, оливиновыми и пироксеновыми, а также мелкими включениями, вероятно, обломками хондр в металле. Непорфириновые хондры встречаются редко. Оливин имеет L-хондритовый химический состав, низко-Са пироксен – H-хондритовый. По степени неравновесия состава оливина метеорит соответствует хондритам 3–4 петрологического типа. Мезостазисом хондр является нераскristализованное и раскristализованное стекло преимущественно альбитового состава. Аксессуарные минералы – фосфаты (апатит, мериллит) и хромит. Металл представлен низко-Ni камаситом и высоко-Ni тэнитом и тетратэнитом, из сульфидов наблюдался только троилит. Изотопный состав кислорода хондр метеоритов NWA 12379/12273 характеризует резервуар формирования аналогичный с LL-хондритами (Jansen et al., 2019; Agee et al., 2019). Распределение сидерофильных элементов

в металле парного метеорита NWA 12273 показывает, что металл испытал частичное плавление (Liu et al., 2023). Возраст его образования ~2.4 млн лет после Ca,Al-включений, и, возможно, он формировался в небулярном резервуаре, соседнем с таковым H-хондритов и железных метеоритов группы ПЕ (Liu et al., 2023). Вероятно, богатые металлом несгруппированные хондриты образовались в результате катастрофического события — столкновения металлического и хондритового тел. Это событие не привело к формированию новых типов хондритов закалочной структуры, возможно, из-за недостаточной мощности. После реаккреции нового родительского тела богатого металлом несгруппированного хондрита и смешения металла с хондрами и их обломками, водные флюиды и метаморфизм воздействовали на вещество NWA 13202 и NWA 12379/12273, что отразилось в появлении кайм железистого оливина вокруг низко-Sa пироксена и фосфатов.

На сегодняшний день изученный богатый металлом хондрит NWA 13202 и парные с ним NWA 12379/12273 являются уникальными среди других богатых металлом хондритов, таких как G, CB и CH-хондриты, и представляют собой новое родительское тело, значительно отличающееся химическими и изотопными характеристиками от уже известных и изученных ранее.

Авторы статьи благодарят научного редактора А. В. Гирниса и рецензента Е. В. Петрову за полезные комментарии и рекомендации, которые значительно улучшили статью.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ FMMZ-2024-0032) Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванова М.А., Петаев М.И. (2015) Характеристика и происхождение компонентов углистого CH хондрита NWA 470. *Петрология* **23**(2), 167–185.
- Agee C.B., Vaci Z., Ziegler K., and Spilde M.N. (2019) Northwest Africa 12273: Unique ungrouped metal-rich chondrite. *Lunar Planet. Sci.* **50**, abstract #1176.
- Anand A., Papea J., Willea M., Mezger K. Anand A. (2021) Chronological constraints on the thermal evolution of ordinary chondrite parent bodies from the ⁵⁵Mn-⁵³Cr system. *Geochim. Cosmochim. Acta* **307**, 281–301.
- Bollard J., Connelly J., and Bizzarro M. (2015) Pb-Pb dating of individual chondrules from the CB_a chondrite Gajba: Assessment of the impact plume formation model. *Meteorit. Planet. Sci.* **50**, 1197–1216.
- Budde G., Burkhardt C., Brennecke G.A., Fischer-Gödde M., Kruijer T.S., and Kleine T. (2016) Molybdenum isotopic evidence for the origin of chondrules and a distinct genetic heritage of carbonaceous and non-carbonaceous meteorites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **454**, 293–303.
- Campbell, A.J., Humayun, M., and Weisberg, M.K. 2002. Siderophile Element Constraints on the Formation of Metal in the Metal-Rich Chondrites Bencubbin, Gajba and Weatherford. *Geochim. Cosmochim. Acta* **66**, 647–60.
- Clayton R.N., Mayeda T.K., Goswami J., and Olsen E.J. (1991) Oxygen isotope studies of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **55**, 2317–2337.
- Connelly J.N., Bizzarro M., Krot A.N., Nordlunds A., Wielandt D., Ivanova M.A. 2012. The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science* **338** (6107), 651–655.
- Cook D.L., Schönbacher M. (2017) Iron isotopic compositions of troilite (FeS) inclusions from iron meteorites. *Astronom. J.* **154**, 172.
- Doyle P.M., Jogo K., Nagashima K., Krot A.N., Wakita S., Ciesla F.J., and Hutcheon I.D. (2015) Early aqueous activity on the ordinary and carbonaceous chondrite parent bodies recorded by fayalite. *Nature Comm.* **6**(7444), 1–10.
- Gattacceca J., McCubbin F.M., Grossman J., Bouvier A., Bullock E., Chennaoui Aoudjehane H., Debaille V., D’Orazio M., Komatsu M., Miao B. and Schrader D.L. 2021. The Meteoritical Bulletin, No. 109. Meteorit. Planet. Sci. 56, 1626–1630.
- Grossman J.N., Brearley A.J. (2005) The onset of metamorphism in ordinary and carbonaceous chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.* **40**, 87–122.
- Fedkin A.V., Grossman L., Humayun M., Simon S.B., and Campbell A.J. (2015) Condensates from vapor made by impacts between metal-, silicate-rich bodies: Comparison with metal and chondrules in CB chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **164**, 236–261.
- Huss G.R., Rubin A.E., and Grossman J.N. (2006) Thermal metamorphism in chondrites. In D.S. Lauretta and H.Y. McSween, editors, Meteorites and the Early Solar System II, pp. 567–586. University of Arizona Press, Tucson AZ.
- Ivanova M.A., Krot A.N. (1994) Chromite chondrules and inclusions in ordinary chondrites. *Geokhimiya* **6**, 642–658.
- Ivanova M.A., Kononkova N.N., Krot A.N., Greenwood R.C., Franchi I.A., Verchovsky A.B., Trieloff M., Korochantseva E.V., Brandstaetter F. (2008). The Isheyev meteorite: Mineralogy, petrology, bulk chemistry, oxygen, nitrogen, carbon isotopic compositions and ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages. *Meteorit. Planet. Sci.* **43**, 915–940.
- Ivanova M.A., Lorenz C.A., Humayun M., Corrigan C.M., Ludwig T., Trieloff M., Richter K., Franchi I.A., Verchovsky A.B., Korochantseva E.V., Kozlov V.V., Teplyakova S.N., Korochantsev A.V., Grokhovsky V.I. (2020) Sierra Gorda 009: A New Member of the Metal-Rich G Chondrites Subgroup. *Meteorit. Planet. Sci.* **55**, 1764–1792.

- Ivanova M.A., Lorenz C.A., Humayun M., Yang S., Ma C., Teplyakova S.N., Franchi I.A., Korochantsev A.V. (2022) Sierra Gorda 013: Unusual CBa-like metal-rich chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.* **57**, 657–682.
- Jansen C.A., Brenker F.E., Krot A.N., Zipfel J., Pack A., Labenne L., Bizzarro M., and Schiller M. (2019) Mineralogy, petrology, and oxygen isotopic composition of Northwest Africa (NWA) 12379, a new metal-rich chondrite with affinity to ordinary chondrites. *Lunar Planet. Sci. Conf.* **50**, abstract #2741.
- Jones R.H. (1998) A compilation of olivine and low-Ca pyroxene compositions in type 4–6 ordinary chondrites. *Lunar Planet. Sci. Conf.* **29**, abstract #1397.
- Jones R.H., McCubbin F.M., Dreeland L., Guan Y., Burger P.V., and Shearer C.K. (2014) Phosphate minerals in LL chondrites: A record of the action of fluids during metamorphism on ordinary chondrite parent bodies. *Geochim. Cosmochim. Acta* **132**, 120–140.
- Kallemeyn G.W., Boynton W.V., Willis J., and Wasson J.T. (1978) Formation of Bencubbin Polymict Meteoritic Breccia. *Geochim. Cosmochim. Acta* **42**, 507–15.
- Kimura M., El Goresy A., Palme H., and Zinner E. (1993) Ca–Al-rich inclusions in the unique chondrite ALH 85085 – Petrology, chemistry, and isotopic compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta* **57**, 2329–2359.
- Kita N.T., Nagahara H., Tachibana S., Tomomura S., Spicuzza M.J., Fournelle J.H., and Valley J.W. (2010) High precision SIMS oxygen three isotope study of chondrules in LL3 chondrites: role of ambient gas during chondrule formation. *Geochim. Cosmochim. Acta* **74**, 6610–6635.
- Kleine T., Touboul M., Bourdon B., Nimmo F., Mezger K., Palme H., Jacobsen S.B., Yin Q.-Z., and Halliday A.N. (2009) Hf–W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets. *Geochim. Cosmochim. Acta* **73**, 5150–5188.
- Koch T.E., Brenker F.E., Prior D.J., Jilly K., Krot A.N., Bizzarro M. (2019) Shock history of the metal-rich CB chondrite Quebrada Chimborazo (QC) 001.82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society, held 7–12 July, Sapporo, Japan. Abstract # 6179.
- Koefoed P., Pravdivtseva O., Oglione R., Jiang Y., Lodders K., Neuman M., Wang K. (2022) The dynamic formation process of the CB chondrite Gujba. *Geochim. Cosmochim. Acta* **332**, 33–56.
- Krot A.N., Ivanova M.A. and Wasson J.T. (1993) The origin of chromitic chondrules and the volatility of Cr under a range of nebular conditions. *Earth Planet. Sci. Letters* **119**, 569–584.
- Krot A.N., Meibom A., Weisberg M.K., and Keil K. (2002) The CR chondrite clan: Implications for early solar system processes. *Meteorit. Planet. Sci.* **37**, 1451–1490.
- Krot A.N., Amelin Y., Cassen P., and Meibom A. (2005) Young chondrules in CB chondrites from a giant impact in the early Solar System. *Nature* **436**, 989–992.
- Krot A.N., Nagashima K., Bizzarro M., Huss G.R., Davis A.M., McKeegan K.D., Meyer B.S. and Ulyanov A.A. (2008) Multiple generations of refractory inclusions in the metal-rich carbonaceous chondrites Acfer 182/214 and Isheyev. *Astrophys. J.* **672**, 713–721.
- Krot A.N., Nagashima K., Yoshitake M. and Yurimoto H. (2010) Oxygen isotope compositions of chondrules from the metal-rich chondrites Isheyev (CH/CB_b), MAC02675 (CB_b) and QUE94627 (CB_b). *Geochim. Cosmochim. Acta* **74**, 2190–2211.
- Krot A.N., Nagashima K. and Petaev M.I. (2012) Isotopically uniform, ¹⁶O-depleted calcium, aluminum-rich inclusions in CH and CB carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **83**, 159–178.
- Krot A.N., Nagashima K., E.M.M. van Kooten, and Bizzarro M. (2017) High-temperature rims around calcium-aluminum-rich inclusions from the CR, CB and CH carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **201**, 155–184.
- Krot A.N., Petaev M.I., Nagashima K., Dobricka E., Johnson B.C., Cashion M.D. (2021) Impact plume-formed and protoplanetary disk high-temperature components in CB and CH metal-rich carbonaceous chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.* **56**, 1–29.
- Krot A.N., Nagashima K., Ivanova M.A., Lauretta D., Libourel G., Brandon C., Johnson B.C., Cashion M.D., Brenker F., Hoffman V., Bizzarro M. (2023) Oxygen isotopic compositions of chondritic and achondritic lithologies in the anomalous CB carbonaceous chondrites Sierra Gorda 013 and Fountain Hills. *Meteorit. Planet. Sci.* **58**(4), 754–777.
- Kruijer T.S., Burkhardt C., Budde G., and Kleine T. (2017) Age of Jupiter inferred from the distinct genetics and formation times of meteorites. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **114**, 6712–6716.
- Lauretta D.S., Goreva J.S., Hill D.H., Killgore M., La Blue A.R., Campbell A., Greenwood R.C, Franchi I.A., Verchovsky A.B. (2009) The Fountain Hills unique CB chondrite: Insights into thermal processes on the CB parent body. *Meteorit. Planet. Sci.* **44**, 823–838.
- Liu H., Ash R.D., Yan Luo Y., Pearson D.G., Liu J. (2023) Siderophile element and Hf-W isotope characteristics of the metal-rich chondrite NWA 12273 – Implication for its origin and chondrite metal formation. *Earth Planet. Sci. Lett.* **612**(15), 118162.
- Lorenz C.A., Ivanova M.A., Zinovieva N.G., Ryazantsev K.M., Korochantsev A.V. (2023) Heterogeneity of planetesimal collisional plume probed by glass inclusions in metal globules of Sierra Gorda 013, unusual CBa-like chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.* **58**, 241–258.
- Lewis J., and Jones R. (2018) Evidence from secondary minerals for three stages of metasomatism during thermal metamorphism in ordinary chondrites. *Lunar Planet. Sci. Conf.* **49**, abstract #2083.
- MacPherson G. J. (2014) Calcium-aluminum-rich inclusions in chondritic meteorites. In: Davis, A.M. (Ed.), Meteorites and Cosmochemical Processes Vol. 1. Elsevier,

- Oxford, pp. 139–179 Treatise on Geochemistry, 2nd Ed. (H. D. Holland, K. K. Turekian).
- Nanne J.A., Nimmo F., Cuzzi J.N., and Kleine T. (2019) Origin of the non-carbonaceous carbonaceous meteorite dichotomy. *Earth Planet. Sci. Lett.* **511**, 44–54.
- Oulton J., Humayun M., Fedkin A., and Grossman L. (2016) Chemical evidence for differentiation, evaporation and recondensation from silicate clasts in Gujba. *Geochim. Cosmochim. Acta* **77**, 254–274.
- Petaev M.I., Meibom A., Krot A.N., Wood J.A., and Keil K. 2001. The Condensation Origin of Zoned Metal Grains in Queen Alexandra Range 94411: Implications for the Formation of the Bencubbin-Like Chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.* **36**, 93–106.
- Rubin A.E., Kallemeyn G.W., Wasson J.T., Clayton R.N., Mayeda T.K., Grady M., Verchovsky A.B., Eugster O., and Lorenzetti S. (2003) Formation of metal and silicate globules in Gujba: a new Bencubbin-like meteorite fall. *Geochim. Cosmochim. Acta* **67**, 3283–3298.
- Russell S.S., McCoy T.J., Jarosewich E. and Ash R.D. 1998. The Burnwell, Kentucky, low iron oxide chondrite fall: Description, classification and origin. *Meteorit. Planet. Sci.* **33**, 853–856.
- Scott E.R.D., Krot A.N. (2014) Chondrites and their components. In *Meteorites and Cosmochemical Processes* (Ed. A. M. Davis), Vol. 1 Treatise on Geochemistry, 2nd Ed. (Exec. Eds. H. D. Holland and K. K. Turekian), Elsevier, Oxford, pp. 65–137.
- Trinquier A., Elliott T., Ulfbeck D., Coath C., Krot A.N., and Bizzarro M. (2009) Origin of nucleosynthetic isotope heterogeneity in the solar protoplanetary disk. *Science* **324**, 374–376.
- Troiano J., Rumble III D., River M.L. and Friedrich J.M. (2011) Compositions of three low-FeO ordinary chondrites: Indications of a common origin with the H chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **75**, 6511–6519.
- van Kooten E.M.M.E., Wielandt D., Schiller M., Nagashima K., Thomen A., Larsen K.K., Olsen M.B., Nordlund Å, Krot A.N., and Bizzarro M. (2016) Isotopic evidence for primordial molecular cloud material in metal-rich carbonaceous chondrites. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **113**, 2011–2016.
- Wark D.A., Lovering J.F. (1977) Marker events in the early evolution of the solar system: Evidence from rims on Ca–Al-rich inclusions from carbonaceous chondrites. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* **8**, 95–112.
- Wasson J.T., and Kallemeyn G.W. 1990. Allan Hills 85085: A subchondritic meteorite of mixed nebular and regolithic heritage. *Earth Planet. Sci. Lett.* **101**, 148–61.
- Warren P.H. (2011) Stable-isotopic anomalies and the accretionary assemblage of the Earth and Mars: A subordinate role for carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **311**, 93–100.
- Weber D., Zinner E., and Bischoff A. (1995) Trace element abundances and magnesium, calcium, and titanium isotopic compositions of grossite-containing inclusions from the carbonaceous chondrite Acfer 182. *Geochim. Cosmochim. Acta* **59**, 803–823.
- Weisberg M.K., Prinz M., Clayton R.N., Mayeda T.K., Grady M.M. and Pillinger C.T. (1995) The CR chondrite clan. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorit.* **8**, 11–32.
- Weisberg M.K., Prinz M., Clayton R.N., Mayeda T.K., Sugiura N., Zashu S., and Ebihara M. (2001) A new metal-rich chondrite grouplet. *Meteorit. Planet. Sci.* **36**, 401–418.
- Weisberg M.K., Ebel D.S., Nakashima D., Kita N.T., and Humayun M. (2015) Petrology and geochemistry of chondrules and metal in NWA 5492 and GRO 95551: A new type of metal-rich chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* **167**, 269–285.
- Weyrauch M., Horstmann M. and Bischoff A. (2018) Chemical variations of sulfides and metal in enstatite chondrites – Introduction of a new classification scheme. *Meteorit. Planet. Sci.* **53**, 94–415.
- Wlotzka F. (1993) A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics* **28**, 460.

**METAL-RICH UNGROUPED CHONDRITE
NORTHWEST AFRICA 13202**© 2025 **M. A. Ivanova***, **K. M. Ryazantsev****, **S. N. Teplyakova*****, **D. A. Sadilenko*******Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
Kosygin Str., 19, Moscow, 119991 Russia***e-mail: meteorite2000@mail.ru; **ryazan-konst@rambler.ru*****elga.meteorite@gmail.com; ****sadilenko@mail.ru*

Received November 19, 2024; revised February 18, 2025; accepted March 7, 2025

A meteorite of a new type, NWA 13202, was revealed for the first time in the collection of the Russian Academy of Sciences. It belongs to metal-rich ungrouped chondrites and is paired with chondrites NWA 12379/12273. These chondrites contain on average ~70 vol. % Fe, Ni metal, and ~20 vol. % of chondrules and silicate inclusions imbedded in metal. Similar to other known metal-rich chondrites (G, CH, CBa, and CBb), there is no fine-grained silicate matrix in NWA 13202. Chondrules are represented mainly by porphyritic olivine-pyroxene, olivine and pyroxene types (POP, OP and PP); non-porphyritic chondrules (BO, SO, CC, RC, GC) are rare. Olivine has an L-chondrite chemical composition, Fa 25.9 ± 3.5 mol. %, and low-Ca-pyroxene is Fs 17.2 ± 5.7 mol. %, which resembles more closely H chondrites. According to the olivine composition heterogeneity, the meteorite corresponds to chondrites of the 3–4 petrological type. Accessory minerals are phosphates and chromite. The metal includes low-Ni kamacite and high-Ni taenite and tetrataenite, and the only sulfide is troilite. The oxygen isotopic composition of chondrule silicates of these ungrouped chondrites confirms their affinities to the oxygen isotope reservoir of LL chondrites (Jansen et al., 2019). The metal experienced partial melting and its formation age is ~2.4 Ma after the formation of Ca,Al – inclusions (Liu et al., 2023). The studied chondrites were probably formed as a result of a catastrophic collision of metallic and chondritic bodies. The intensity and conditions during this event were not sufficient to form chondrules with chondrules of a quenched structure such as CC and SO types. After the reaccretion of a new parent body of the metal-rich ungrouped chondrite, the material of NWA 13202 and NWA 12379/12273 was affected by aqueous alteration and metamorphism at a temperature of ~600°C, which produced phosphates and rims of Fe-rich olivine around low-Ca pyroxene.

Keywords: metal-rich chondrites, porphyritic and nonporphyritic chondrules, catastrophic impact events, reaccretion, aqueous alteration, fluid, parent body thermal metamorphism