

УДК 52-468; 552.6

ПРИРОДНЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Cu–Ni ИЗ ИМПАКТИТОВ КРАТЕРА ЛОНАР (ИНДИЯ) И ЛУННОГО РЕГОЛИТА

© 2024 г. Т. А. Горностаева*, П. М. Каргашов, А. В. Мохов,
А. П. Рыбчук, А. Т. Базилевский

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
(ГЕОХИ РАН), Москва, Россия
e-mail: tagorn8@mail.com

Поступила в редакцию 19.12.2023 г.

После доработки 26.01.2024 г.

Принята к публикации 10.02.2024 г.

Проведено сравнительное изучение импактных стекол кратера Лонар, расположенного на базальтовом плато Декан, Индия, и импактных стекол из лунного реголита, доставленного советскими автоматическими станциями (АС) Луна-16 и Луна-24 (Море Изобилия и Море Кризисов). В импактитах кратера Лонар и реголите Луны обнаружены многочисленные природные сплавы (Cu_3Ni_2 , Ni_2Cu и Ni_3Cu), которые ранее не были известны в природе. Обнаружение таких сплавов расширяет область изоморфизма в системе Cu–Ni. В результате сравнения импактитов Земли и Луны обнаружено сходство в составе, размере и морфологии частиц медно-никелевых сплавов, что может являться индикатором импактных процессов. Одним из возможных механизмов образования частиц Ni–Cu являлась конденсация из газовой-плазменного облака. Возможным источником вещества для сплавов Cu–Ni были одновременно и материал ударника, и материал мишени.

Ключевые слова: Луна, Луна-16, Луна-24, импактиты, кратер Лонар, сплавы системы Cu–Ni, самородный никель, ударник, импактные стекла, СЭМ, ЭДС

DOI: 10.31857/S0320930X24040024, EDN: LUUPTW

ВВЕДЕНИЕ

На Земле известно лишь несколько импактных кратеров, которые образованы в результате бомбардировки базальтовых мишеней. Один из них – кратер Логанча – импактная структура, расположенная в Восточной Сибири (Красноярский край, Россия), которая находится на сибирских трапповых базальтах (Komatsu и др., 2019). Однако эта структура труднодоступна для изучения, размытая, плохо сохранившаяся и есть лишь единичные результаты ее исследования (Фельдман и др., 1983; Masaitis, 1999). Еще одной из недавно подтвержденных ударных структур на базальтовой мишени является кратер Виста-Алгребре (Бразилия) (Crosta и др., 2010), изучение которой активно проводится последние несколько лет (Pittarello и др., 2015; Vasconcelos и др., 2019). Одной из наиболее изученных и хорошо сохранившихся импактных

структур является кратер Лонар, расположенный на базальтовых покровах плато Декан, округ Булдана, шт. Махараштра, Индия ($19^\circ 59'$ с.ш., $76^\circ 31'$ в.д.). Таким образом, кратер Лонар на данный момент является наиболее удачным объектом для сравнительного изучения высокотемпературного преобразования минерального вещества при высокоскоростных ударах в условиях Луны и Земли.

Кратер Лонар имеет чашеобразную форму и диаметр ~ 1.88 км и частично заполнен озером. Глубина кратера составляет порядка 150 м от края вершины кольцевого вала до уровня озера. Озеро глубиной 7–10 м заполнено постимпактными отложениями мощностью 30–100 м, которые подстилаются импактной брекчией до глубины ~ 325 м (Fredriksson и др., 1973). Возраст кратера Лонар по последним данным составляет 0.576 ± 0.047 млн лет (Schmieder, Kring, 2020). Достаточно хорошо изучены геология (Frederiksson

и др., 1973; Maloof и др., 2010), геофизические параметры кратера Лонар, а также геохимия исходных базальтов и импактитов. Породами мишени являются базальты Деканских траппов возрастом 65 млн лет (Sen, Chandrasekharam, 2011). Глубина подошвы слоя базальтов, являющегося мишенью, оценивается приблизительно в 520–570 м от поверхности (Chandran и др., 2021). Подстилающими базальты породами являются архейские гнейсы. Вовлечение последних в ударное плавление предполагается, в частности, в работах (Das Gupta и др., 2017) и (Chandran и др., 2021).

Подтверждением импактного генезиса кратера Лонар являются находки импактных стекол, в том числе тектитоподобных стеклянных сферул размером, не превышающим 1 мм (Son, Koeberl, 2007; Ray, Misra, 2014), а также маскелинита (Fredriksson и др., 1973; Murali и др., 1987; Nayak, 1993) и коэсита (Jaret и др., 2017).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе описываются результаты электронно-микроскопического анализа образцов стекол из ударного кратера Лонар, Индия. Эти образцы были собраны в 1983 г. в выбросах из этого кратера сотрудниками ГЕОХИ АН СССР А.Т. Базилевским и М.А. Назаровым (Базилевский, Назаров, 1983).

В качестве объекта сравнения были изучены образцы лунного реголита, доставленного советскими автоматическими станциями АС Луна-16 и Луна-24 (Море Изобилия и Море Кризисов).

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

В ходе исследований были использованы сканирующие электронные микроскопы (СЭМ) JEOLJSM-5610 и Tesla MIRA-3, оснащенные рентгеновскими энергодисперсионными спектрометрами (ЭДС) Oxford Aztec. Высоколокальные методы аналитической электронной микроскопии включали в себя получение картин во вторичных (SE) и отраженных (BSE) электронах, точечных элементных анализов и карт распределения элементов по заданной площади.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ранее нами были рассмотрены состав и морфология выделений сплавов системы Fe–Ni из импактитов кратера Лонар и Луны (Горностаева и др., 2023). В продолжение этой работы целью настоящего исследования являлось расширение представлений об образовании интерметаллидов в импактных процессах. Задачей исследований был поиск и диагностика минеральных фаз двойной системы Ni–Cu в импактных стеклах кратера Лонар и реголита Луны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При изучении образца лунного реголита, доставленного АС Луна-16, среди частиц стекла

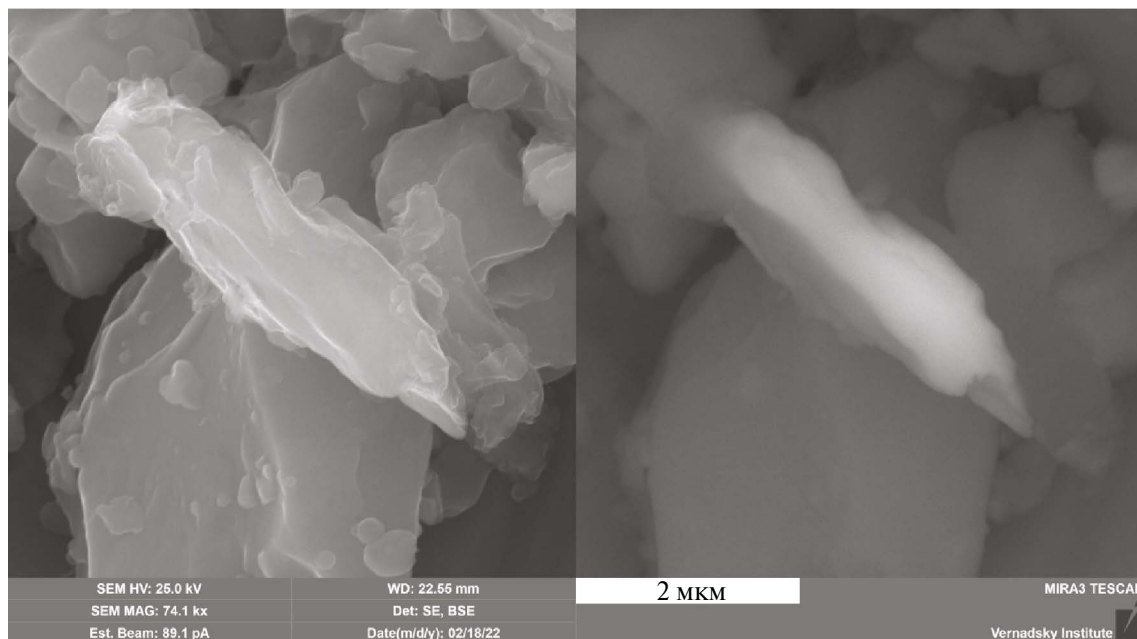


Рис. 1. Частица самородного никеля с примесью меди и цинка в матрице импактного стекла Луна-24. СЭМ. Слева — вторичные электроны. Справа — отраженные электроны.

состава HASP была обнаружена частица вытянутой формы размером около 3 мкм (рис. 1). Во вторичных электронах хорошо видна стеклянная пленка, покрывающая эту частицу. Морфология стеклянной пленки явно указывает на импактное ее происхождение.

В энергодисперсионном рентгеновском спектре, полученном от этой частицы, зафиксированы пики Ni высокой интенсивности и менее интенсивные пики Cu и Zn, и кроме того, пики слабой интенсивности O, Al, Si, Ca и Fe. Чтобы определить состав обнаруженной частицы было проведено ЭДС-картирование, которое показало приуроченность Ni, а также Cu и Zn к анализируемой частице (рис. 2). Отсутствие кислорода свидетельствует о металлической форме обнаруженной частицы никеля. Кроме того, в этом металле полностью отсутствует железо. O, Al, Si, Ca и Fe принадлежат окружающей стеклянной матрице и, видимо, были флуоресцентно возбуждены при ЭДС-анализе от покрывающей ее стеклянной пленки.

Количественный расчет по результатам ЭДС-анализа с учетом вычитания окружающей стеклянной матрицы показал, что обнаруженная частица имеет состав $\text{Ni}_{0.90}\text{Cu}_{0.06}\text{Zn}_{0.04}$.

Присутствие высокочистого самородного никеля может являться критерием для идентификации метеоритного вещества как на Луне, так и на Земле. Ранее нами был обнаружен листовидный агрегат частиц самородного никеля размером в несколько микрон в импактных стеклах кратера Лонар (Горностаева и др., 2023). Похожие по морфологии и размеру частицы самородного никеля были найдены нами в реголите АС Луна-24 (Карташов и др., 2010). Однако никаких примесей других металлов к никелю в обнаруженных ранее частицах зафиксировано не было. Также стоит отметить, что в настоящем исследовании при изучении импактных стекол кратера Лонар мы не зафиксировали частиц самородного никеля с небольшими примесями меди и цинка. Однако нами было найдено несколько частиц никеля с высоким содержанием меди.

При изучении полированного образца из кратера Лонар в массе импактного стекла был обнаружен скелетный кристалл ильменита, в котором зафиксировано яркое по контрасту в отраженных электронах включение размером около 0.5 мкм (рис. 3). Обращает на себя внимание каплевидная форма обнаруженного включения. Небольшой размер обнаруженного включения не позволил получить карт распределения элементов для подтверждения самородного его

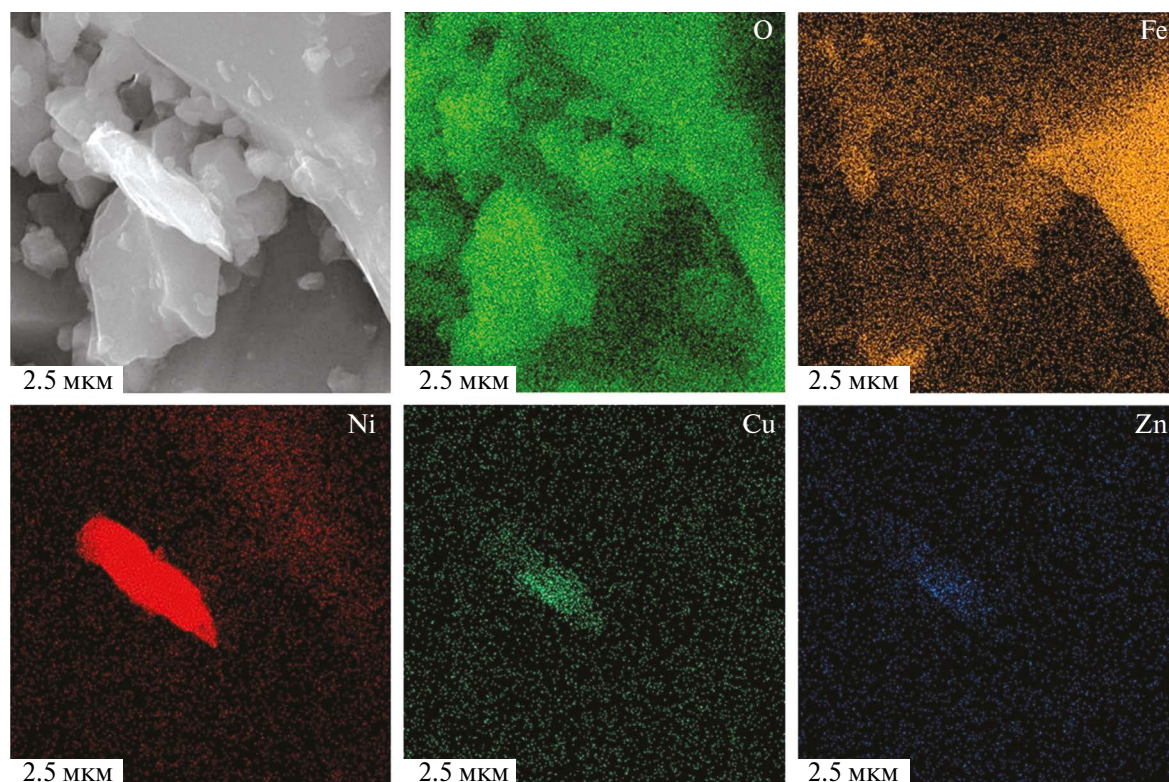


Рис. 2. Карта распределения элементов от участка образца, представленного на рис. 1. Луна-24. СЭМ, отраженные электроны, рентгеновское характеристическое излучение.

состояния. Однако достаточно яркий контраст в отраженных электронах по сравнению с окружающей кислородсодержащей ильменитовой матрицей позволил нам сделать вывод об отсутствии кислорода в этом включении. Количественный расчет с учетом влияния состава вмещающего ильменита показал, что состав включения следующий: $(\text{Ni}_{2.81}\text{Cr}_{0.25})_{3.06}\text{Cu}_{0.94}$, что близко соответствует метрике Ni_3Cu .

В нескольких образцах импактного стекла из кратера Лонар были обнаружены яркие по контрасту в отраженных электронах листовидные Ni–Cu содержащие частицы размером от 10 до 30 мкм (рис. 4). На снимке во вторичных электронах видно, что обнаруженные частицы утоплены в стеклянной матрице, а также покрыты стеклянной пленкой. Кроме того,

на поверхности самой крупной частицы зафиксировано несколько стеклянных шариков размером 2 и 0.5 мкм. Размер и морфология этих шариков указывают на их расплавную природу.

Достаточно большой размер обнаруженных частиц позволил получить карты распределения элементов (рис. 5). Карты распределения элементов, полученные от наиболее крупной из частиц, выявили, что в ее составе кроме никеля и меди не содержится других элементов, а отсутствие кислорода подтвердило самородный ее характер. На карте распределения кремния отчетливо видна его локализация в стеклянных шариках на поверхности Ni–Cu содержащей частицы. Видимо, они имеют высококремниевый состав с небольшим содержанием железа.

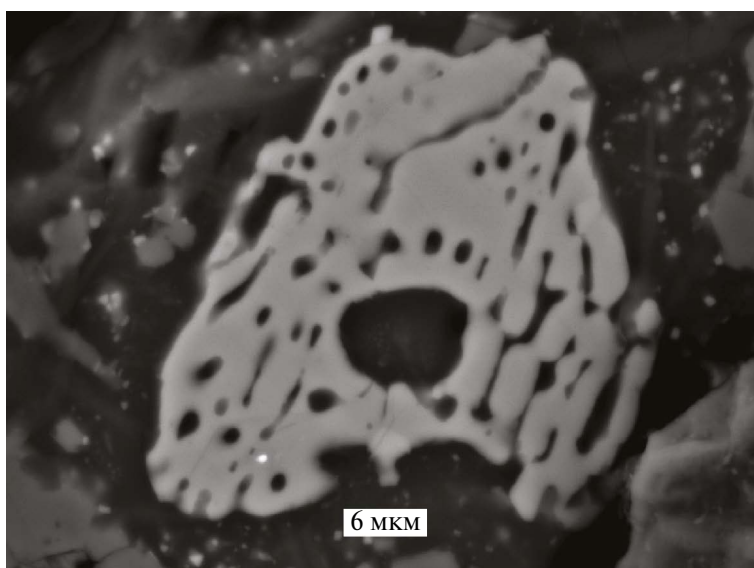


Рис. 3. Каплевидное включение Ni_3Cu в частице ильменита. Кратер Лонар. СЭМ. Отраженные электроны.

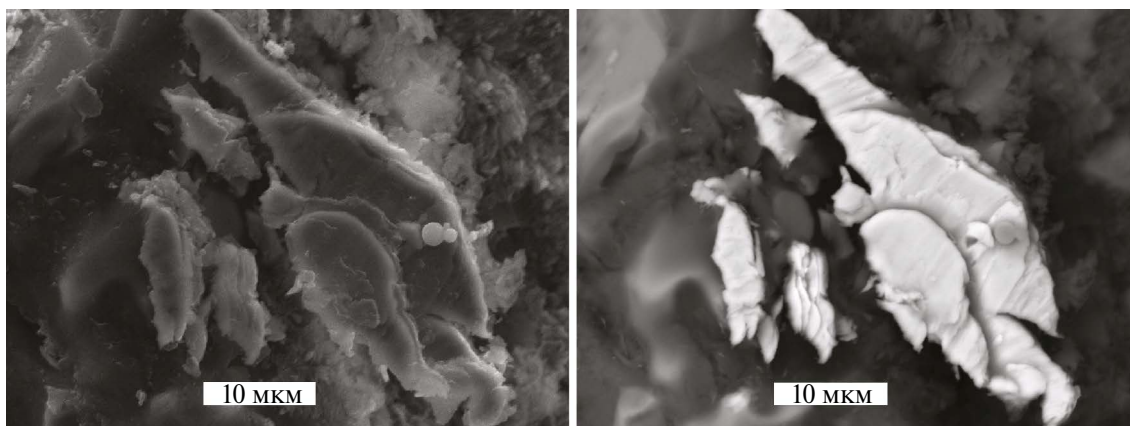


Рис. 4. Агрегат листовидных кристаллов Ni_3Cu в матрице импактного стекла. Кратер Лонар. СЭМ. Слева — вторичные электроны. Справа — отраженные электроны.

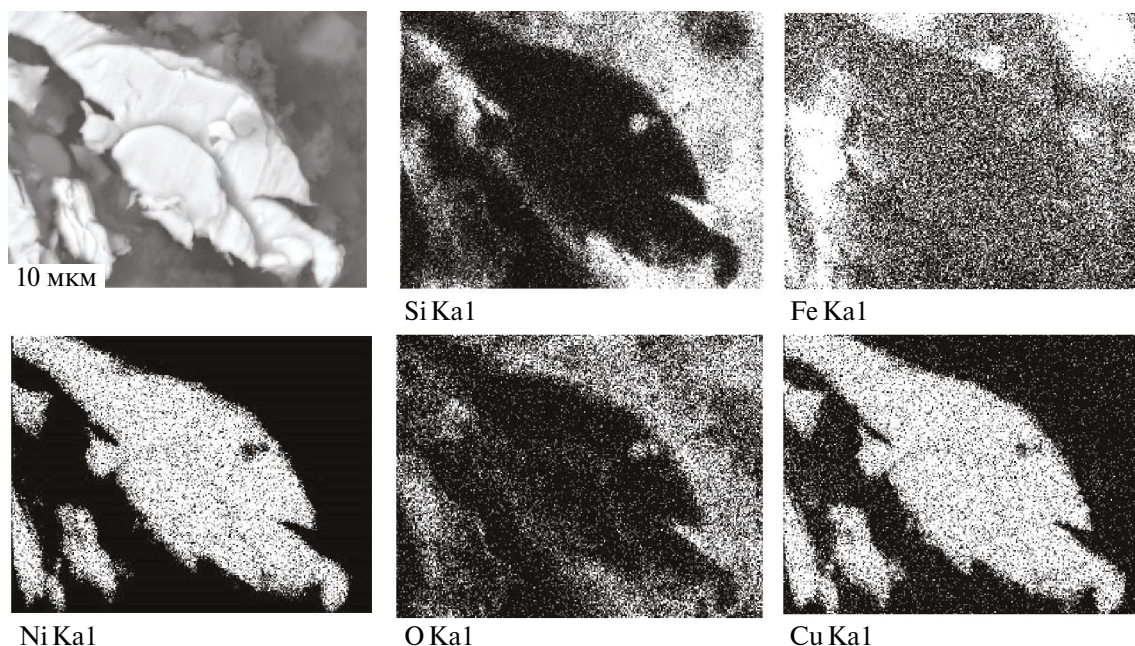


Рис. 5. Карта распределения элементов от участка образца, представленного на рис. 4. Кратер Лонар. СЭМ, отраженные электроны, рентгеновское характеристическое излучение.

Усредненный количественный расчет эмпирической формулы по данным с нескольких точек анализа, снятых с разворотом образца относительно детектора для уменьшения влияния неправильной формы поверхности частицы, дал $\text{Ni}_{2.84}\text{Cu}_{1.16}$, что так же близко соответствует метрике Ni_3Cu .

В нескольких образцах импактных стекол из кратера Лонар были обнаружены Ni–Cu частицы с более высоким содержанием меди. В образце импактного стекла было обнаружено несколько содержащих Ni–Cu листовидных частиц и их агрегатов, распределенных в матрице импактного стекла

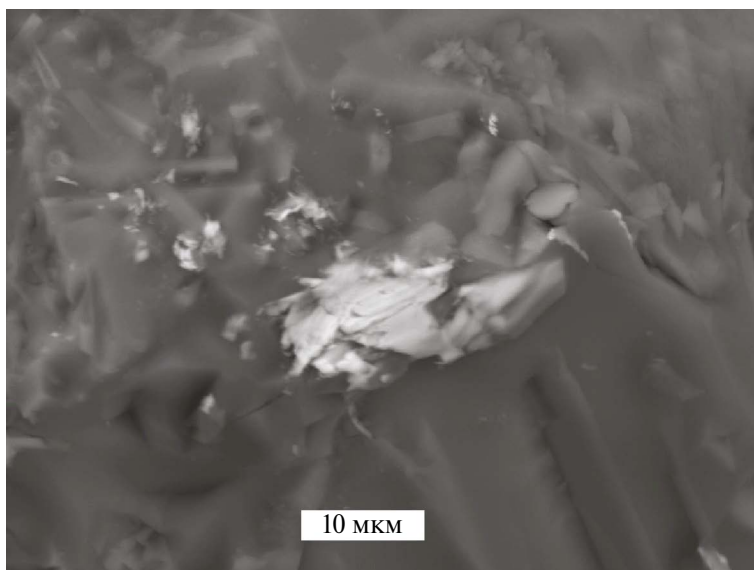


Рис. 6. Частицы Ni_2Cu в матрице импактного стекла. Кратер Лонар. СЭМ, отраженные электроны, рентгеновское характеристическое излучение.

(рис. 6). Размер частиц составил от 1 до 10 мкм. Для каждой из представленных на рис. 6 частиц был проведен ЭДС-анализ. Полученные составы были очень близки и в среднем по расчету составили $\text{Ni}_{2.14}\text{Cu}_{0.86}$, что соответствует метрике Ni_2Cu . В ЭДС-спектре нескольких частиц был зафиксирован интенсивный пик Fe, а также менее интенсивные пики O, Si, Ti и Ca. Согласно картам распределения, частицы Ni_2Cu не содержат в своем составе O, Fe, а также S. Самый крупный агрегат частиц Ni_2Cu сростается с агрегатом частиц самородного железа, не содержащего никеля.

Несколько близких по составу содержащих Ni–Cu листовидных частиц были обнаружены в препаратах лунного реголита, доставленного АС Луна-24. Одна из таких частиц представлена на рис. 7.

Стоит отметить, что морфология обнаруженных частиц и их агрегатов схожа с частицами подобного состава, обнаруженными в импактных стеклах кратера Лонар (рис. 5, рис. 6). Обнаружены как отдельные частицы псевдогексагональных очертаний, представленные сильно уплощенными вдоль одной из осей третьем порядке октаэдрами, так и их агрегаты размером около 10 мкм. На снимке во вторичных электронах видно стеклянное покрытие на поверхности этих частиц. Карты распределения (рис. 8) подтвердили локализацию меди и никеля в них, а также отсутствие кислорода. Расчет, выполненный на основе ЭДС-анализов, полученных от этих частиц, показал, что они

имеют средний состав $\text{Ni}_{2.11}\text{Cu}_{0.89}$, что соответствует метрике Ni_2Cu .

В образцах лунного реголита были обнаружены так же подвергшиеся пластической деформации частицы Ni_2Cu без правильных кристаллографических очертаний, неправильной чешуйчатой формы (рис. 9). Размер таких частиц не превышает нескольких микрон. Как видно на снимке во вторичных электронах, частица Ni_2Cu покрыта слоем стекла, которое по морфологии соответствует конденсатному стеклу, обнаруженному в лунном реголите (рис. 9).

В одном из образцов импактного стекла из кратера Лонар была обнаружена псевдотетрагональная таблитчатая Cu–Ni частица размером около 5 мкм (рис. 10). Очевидно, это сильно уплощенный вдоль одной из четверных осей кубический кристалл. В нем отмечается более высокое по отношению к никелю содержание меди. Согласно ЭДС-анализу его состав $(\text{Cu}_{2.10}\text{Zn}_{0.76})_{2.86}\text{Ni}_{2.14}$, что соответствует метрике $(\text{Cu}, \text{Zn})_3\text{Ni}_2$ при отношении Cu:Ni ~ 1:1.

Чистая самородная медь без примесей никеля была неоднократно в ходе проводимых нами исследований встречена в разных образцах импактитов Лонара. Причем размер ее выделений колебался от нанометров в препаратах просвечивающей электронной микроскопии, и до 10 мкм в образцах, исследованных на СЭМ. Во всех случаях она тесно ассоциировалась с различными стеклами как конденсатной, так и расплавной природы.

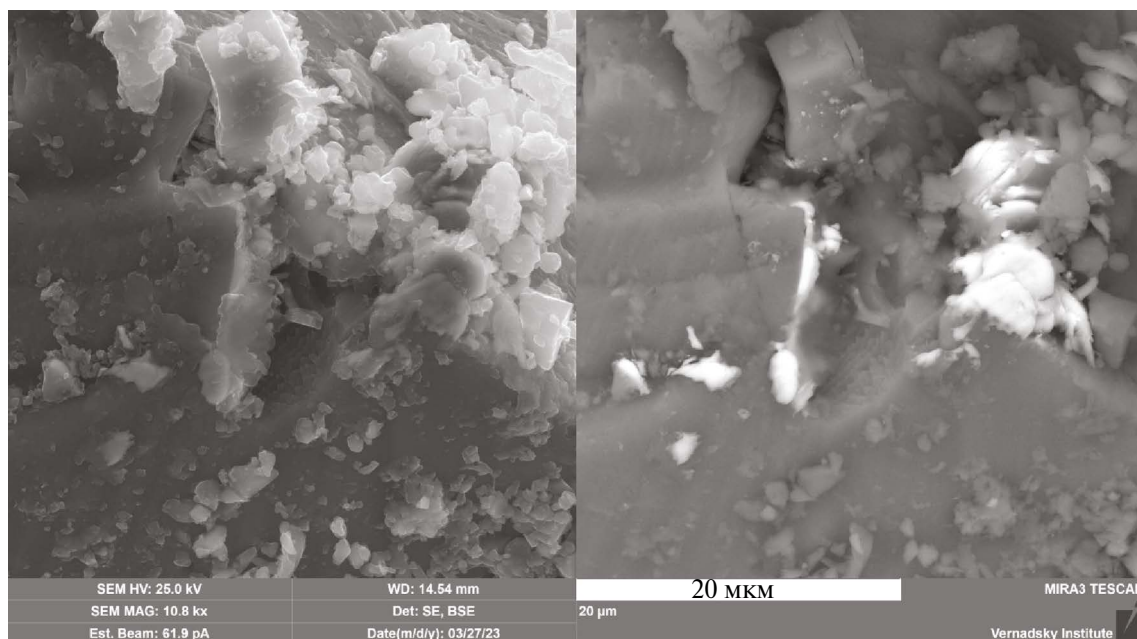


Рис. 7. Агрегат листовидных частиц Ni_2Cu в матрице стекла лунного реголита. Луна-24. СЭМ. Слева — вторичные электроны. Справа — отраженные электроны.

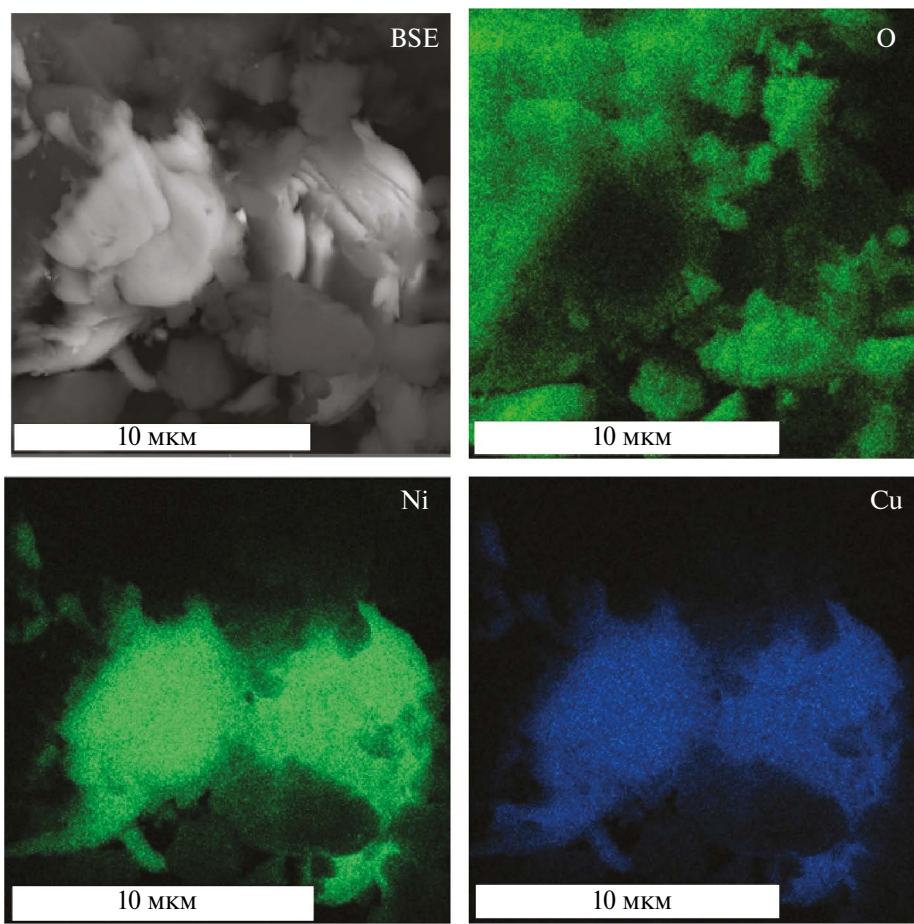


Рис. 8. Карта распределения элементов от частицы Ni_2Cu . Луна-24. СЭМ.

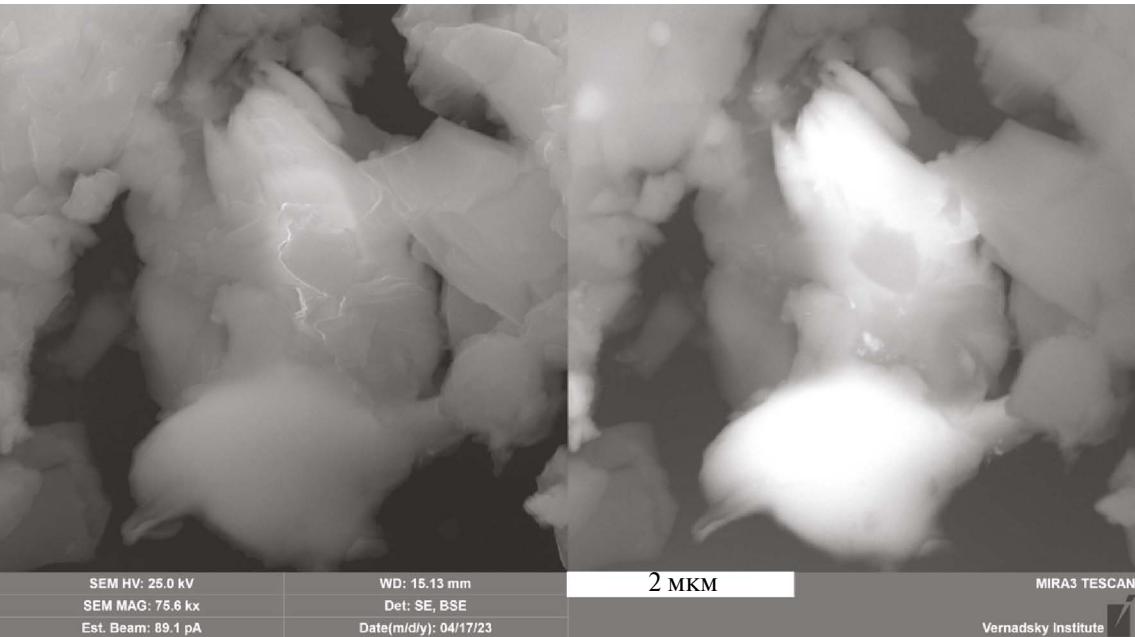


Рис. 9. Частица Ni_2Cu в матрице стекла лунного реголита. Луна-24. СЭМ. Слева – вторичные электроны. Справа – отраженные электроны.

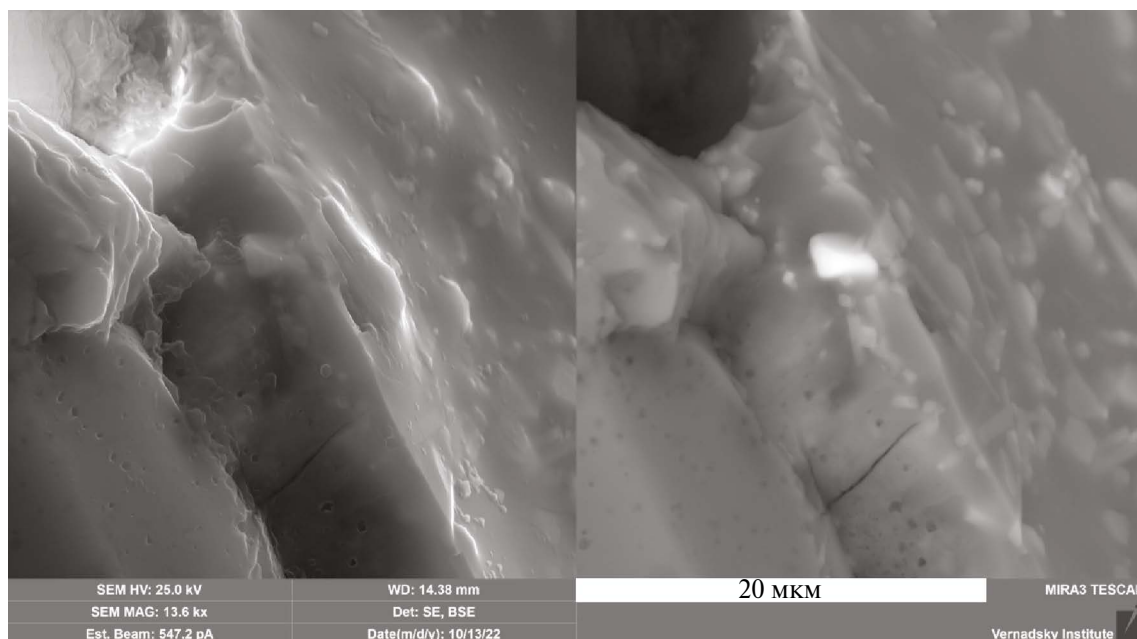


Рис. 10. Частица $(\text{Cu}, \text{Zn})_3\text{Ni}_2$ в импактном стекле. Кратер Лонар. СЭМ. Слева — вторичные электроны. Справа — отраженные электроны.

ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку в импактном процессе глубокой переработке подвергаются как породы мишени, так и ударника, то необходимо учитывать содержания рассматриваемых элементов в породах мишени и потенциального ударника.

Одним из основных маркеров присутствия ударного вещества в кратере является повышенное, по сравнению с породами мишени, содержание Ni, который является важным компонентом большинства известных типов метеоритов (например, Steele и др., 2012). Чаще всего такое сравнение проводится на основе статистически значимого массива данных по составу импактитов и пород мишени для дальнейшей вероятностной оценки типа ударника. Известен ряд находок вещества ударника, преобразованного в результате плавления вещества мишени и ударника в виде металлических сферул или ликвантов, разделенных на несколько фаз (Chao и др., 1964). Так сферулы с содержанием Ni в 10–13 мас. % были обнаружены в филиппинитах и индошинитах (Chao и др., 1964), в импактитах Вабар и Аризонского метеоритного кратера (Reid и др., 1964; Chao и др., 1964), а также в иргизитах (Glass и др., 1983). Есть единичные находки неизмененного вещества ударника, которое представлено легко преобразуемыми минералами, например, фосфидами железа-никеля — шрейберзитом, барринджеритом, обнаруженными в импактных структурах

Цэнхэр и Жаманшин (Салтыковский и др., 2011; Горностаева и др., 2018). Самородный никель был обнаружен в лунном реголите, доставленном АС Луна-24 (Карташов и др., 2010), а также в импактных стеклах кратера Лонар (Горностаева и др., 2023).

Большинство исследований по определению типа ударника кратера Лонар сходятся во мнении, что вероятнее всего это был хондрит (Ray и др., 2017; Schulz и др., 2016; Mougel и др., 2019; Chandran и др., 2023). Ранее обнаруженные нами в импактитах самородный никель, тэнит и высоконикелевый камасит подтверждают гипотезу о хондритовом типе ударника (Горностаева и др., 2023). Были предприняты попытки для уточнения типа хондрита. Так по данным (Ray и др., 2017) ударником, вероятнее всего, был хондрит ЕН-типа, по другим данным, скорее всего, это был СМ-хондрит (Mougel и др., 2019). Средние концентрации Ni в хондритах составляют от 10.2 до 17.5 ppm, причем в ЕН-типе хондрита содержание никеля самое высокое и составляет 17.5 ppm, а в СМ-хондритах — 12.0 ppm, (Wasson, Kallemeyn, 1988). Обыкновенные хондриты содержат в своем составе 70–100 ppm меди, которая сосредоточена в основном в Fe–Ni сплавах (Łuszczek, Krzesińska, 2020).

Содержание Ni в деканских базальтах в районе кратера Лонар — 52–206 ppm и в среднем составляет 90 ppm (Osae и др., 2005), а по данным (Das Gupta и др., 2017) — 59.8 ppm. Содержание Ni в импактитах кратера Лонар находится в интервале 64–156 ppm и в

среднем составляет 86 ppm (Osae и др., 2005). То есть наблюдается незначительное обогащение импактитов никелем за счет материала ударника.

Содержание Cu в базальтах кратера Лонар по данным (Osae и др., 2005) 194–269 ppm и в среднем составляет 219 ppm, а по данным (Das Gupta и др., 2017) среднее содержание Cu в базальтах мишени в среднем составляет 138.4 ppm. В расплавных импактитах и брекчиях кратера Лонар содержание Cu – 149–228 ppm и в среднем составляет 184 ppm. Интересные данные получены при изучении тектито-подобных сферул (Ray и др., 2017) размером 250 мкм в которых зафиксировано повышенное содержание Cu – до 400 ppm, а также повышенные содержания Ni. Причем отмечается значительный разброс в содержании Cu в этих стеклянных шариках. Именно в этих стеклянных шариках зафиксировано присутствие компонентов метеоритного вещества, которое подвергалось испарению и конденсации. Таким образом, содержание меди в породах мишени превышает таковые в веществе предполагаемого ударника. В то же время импактиты заметно обогащаются медью по сравнению с материалом как мишени, так и ударника. Иными словами, происходит концентрирование меди в продуктах импактного процесса.

Теоретические температуры конденсации для меди и никеля близки (расчетная температура конденсации Cu – 1037 K; Ni – 1353 K) к температуре конденсации железа (расчетная температура конденсации – 1334 K) (Lodders, 2003), которое, как показывают испарительные эксперименты, является легколетучим (Маркова и др., 1986). При ударном испарении базальтовых аналогов лунных пород потери содержания железа более интенсивные по сравнению с кремнием и достигают 2–3 раз (Яковлев и др., 2003). Образование железистых конденсатов по результатам экспериментов, на примере модельных стекол лунного реголита, лежит в пределах ~1500°–1700°C (Яковлев и др., 2011). Теоретически существует вероятность образования Ni–Cu частиц путем конденсации из газово-плазменного облака. Таким образом, вероятно, что источником вещества для Cu–Ni сплавов в импактитах Лонара были одновременно материал и ударника, и мишени. Причем Cu преимущественно поступала из деканских базальтов, а Ni из материала хондритов. Обилие находок частиц самородной меди, обнаруженных нами в морских лунных базальтах позволяет предполагать такое же соотношение космогенного и лунного источников вещества для образования Cu–Ni сплавов и в лунном реголите.

Природные сплавы системы Cu–Ni встречаются несопоставимо реже сплавов системы Fe–Ni. Самородная медь различного происхождения практически никогда не содержит сколько-нибудь значимых примесей никеля. Все известные ранее находки самородного

никеля принадлежат системе Fe–Ni и рассмотрены нами в статье (Горностаева и др., 2023). Три известные находки никелистой меди приурочены к зонам серпентинизации ультраосновных массивов. Впервые никелистая медь с содержанием 15 мас. % Ni (по нашим данным до 21 мас. %) была обнаружена в серпентините Родионовского хромитового месторождения (Попов и др., 2013). Практически одновременно нами была найдена никелистая медь с 5 мас. % Ni в составе галек джозефинита из Джозефин-Крик в Орегона, США (<https://www.mindat.org/photo-558249.html>). Позднее медь с содержанием 4.5–7 мас. % Ni была описана в серпентинитах Безымьянного ультрабазитового массива в Туве (Леснов и др., 2022). Все эти находки связаны с процессами взаимодействия различных сульфидов с восстановленными флюидами, возникающими в процессе серпентинизации оливина. Здесь никелистая медь тесно ассоциирует с сульфидами никеля (хизлевудитом, миллеритом, пентландитом) и аваруитом различного состава Ni_3Fe – Ni_2Fe .

Из других известных в литературе самородных фаз, одновременно богатых медью и никелем, можно упомянуть сплав с метрикой Ni_2Me , принадлежащий системе Ni–Cu–Al и обнаруженный в реголите из Моря Кризисов на Луне (Мохов и др., 2018). Отсутствие в ассоциации с данным сплавом фаз ряда $NiAl$ – Cu_3Al позволяет сделать вывод о его происхождении, исключающем вероятность его кристаллизации из расплава. Предполагается, что данная фаза возникла вследствие газоконденсатных реакций в потоках восстановленных флюидов.

Фазы состава Cu_4Zn_2Ni и Ni_2Cu_2Zn отмечались в триасовых углеродисто-кремнистых породах Сихотэ-Алиня (Волохин, Карабцов, 2016). Предполагается, что они образовались при катагенезе осадков за счет переотложения металлов, содержащихся в подвижных фракциях битумоидов. Вторая из этих фаз очень похожа по составу на $(Cu, Zn)_3Ni_2$, обнаруженную на Лонаре, так что нельзя исключить и космогенное ее происхождение в породах Приморья.

В импактитах Лонара фазы системы Cu–Ni представлены максимально разнообразно – от чистой меди через $(Cu, Zn)_3Ni_2$, Ni_2Cu и Ni_3Cu до медистого никеля. Обращает на себя внимание то, что в реголите Луны фазы такого же состава Ni_2Cu и Ni_3Cu образуют выделения схожего размера и морфологии, что свидетельствует о сходстве способа их образования при близких параметрах развития импактного процесса.

В отличие от системы Fe–Ni, фазовая диаграмма которой осложнена наличием кубических объемно-центрированных, упорядоченных и разупорядоченных гранецентрированных фаз и тетрагонального FeNi, система Cu–Ni очень проста и представлена непрерывным изоморфным рядом фаз с кубической

гранецентрированной ячейкой (Дриц и др., 1979). Таким образом, в соответствии с “правилом 50%” (Nickel, 1992) в этой системе выделяются только два минеральных вида – самородная медь и самородный никель с их никелистыми и медистыми разновидностями, соответственно. Иными словами, сплавы с метриками Cu_3Ni_2 , Ni_2Cu и Ni_3Cu не могут являться собственно минералами. Твердые растворы с такими отношениями меди и никеля лишь маркируют составы, наиболее часто реализуемые в природе при сходных условиях. Как мы видим, изоморфный ряд Cu–Ni, не имея кристаллохимических ограничений, в обычных геологических условиях в силу геохимических причин очень ограничен и сдвинут в сторону меди. Специфические P–T условия и особая динамика импактных процессов снимают ограничения обычной геохимии и существенно расширяют область проявления изоморфизма в системе Cu–Ni. Причем появление высоконикелевых сплавов в этой системе приобретает значение типоморфного признака. Иными словами, обнаружение никеля с высокими примесями меди в каком-то геологическом объекте может являться индикатором наличия импактных процессов/событий на его территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В импактитах кратера Лонар и реголите Луны обнаружены многочисленные природные сплавы (с метриками Cu_3Ni_2 , Ni_2Cu и Ni_3Cu) обогащенного никелем сектора двойной системы Cu–Ni.

2. Такие сплавы ранее не были известны в природе и значительно расширяют обычно подавленную (в силу геохимических причин) область изоморфизма в системе Cu–Ni.

3. Обнаружено исключительно близкое сходство в химизме, размере и морфологии частиц медно-никелевых сплавов из импактитов Земли и Луны. Эти типоморфные особенности могут являться индикатором импактных процессов как на Земле, так и в космосе. Теоретически существует вероятность образования Ni–Cu частиц путем конденсации из газовой-плазменного облака. Таким образом, вероятно, что источником вещества для Cu–Ni сплавов в импактитах Лонара были одновременно и материал ударника, и материал мишени.

Работа выполнена за счет бюджетных средств по госзаданию ГЕОХИ РАН в рамках темы FMMZ-2024-0048 “Развитие комплекса взаимодополняющих методов изучения химического состава, трансформации и миграции нано/микрочастиц и легкоподвижных форм элементов в окружающей среде, Земной коре и Лунном реголите”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевский А.Т., Назаров М.А.* Отчет о результатах командирования ученых за границу; страна командирования Индия. М.: ГЕОХИ АН СССР, 1983. 16 с.
2. *Волохин Ю.Г., Карабцов А.А.* Минералы в углеродистых силицитах триаса Сихотэ-Алиня // Литология и полезные ископаемые. 2016. № 5. С. 465–484.
3. *Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатилов О.А.* Тип ударника, образовавшего кратер Жаманшин (Казахстан) // Петрология. 2018. Т. 26. № 1. С. 90–104.
4. *Горностаева Т.А., Карташов П.М., Мохов А.В., Рыбчук А.П., Базилевский А.Т.* Самородные металлы ряда никель–железо из импактитов кратера Лонар (Индия) // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 4. С. 1–13. (*Gornostaeva T.A., Kartashov P.M., Mokhov A.V., Rybchuk A.P., Basilevsky A.T.* Native Nickel–Iron Metals from Lonar Crater Impactites (India) and Regolith of the Moon // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. P. 295–306).
5. *Дриц М.Е., Бочвар Н.Р., Гузей Л.С., Лысова Е.В., Падешнова Е.М., Рохлин Л.Л., Туркина Н.И.* Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник. М.: Наука, 1979. 248 с.
6. *Карташов П.М., Мохов А.В., Горностаева Т.А., Богатилов О.А., Ашихмина Н.А.* Минеральные фазы на сколах стеклянных частиц в препарате тонкодисперсной фракции из пробы реголита АС “Луна 24” // Петрология. 2010. Т. 18. № 2. С. 115–133.
7. *Леснов Ф.П., Королюк В.Н., Ойдунов Ч.К., Монгуш А.А.* Первая находка “никелистой меди” в ультрамафитах // Научная конференция “Петрология и рудоносность магматических формаций”. Новосибирск, 25–29 апреля 2022 г. С. 124–126.
8. *Маркова О.М., Яковлев О.И., Семенов Г.А., Белов А.Н.* Некоторые общие результаты экспериментов по испарению природных расплавов в камере Кнудсена // Геохимия. 1986. № 11. С. 1559–1569.
9. *Мохов А.В., Горностаева Т.А., Карташов П.М., Рыбчук А.П., Богатилов О.А.* Самородные сплавы систем Pd–Pt и Ni–Cu–Al из реголита АС “Луна-24” // Докл. АН. 2018. Т. 481. № 1. Р. 81–84.
10. *Попов В.А., Колисниченко С.В., Блинов И.А.* Никелистая медь и накауриит из Голубой жилы в ультрамафитах (Верхнеуфалейский район, Южный Урал) // Четырнадцатые Всерос. научн. чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова. Миасс: Имин УрО РАН, 2013. С. 13–24.

11. Салтыковский А.Я., Цельмович В.А., Байараа Т., Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Коматсу Дж., Ормоо Ю. Импактный кратер и состав космического вещества в раннепалеозойской структурной зоне Южной Монголии // Двенадцатая Международный. конф. "Физико-химич. и петрофизич. исслед. в науках о Земле". Москва–Борок 3–6 октября 2011 г. Материалы конференции. Москва, 2011. С. 298–302.
12. Фельдман В.И., Коротаева Н.И., Свешникова Е.В. Инфракрасные спектры тектитов, импактитов и обсидианов // Изв. АН СССР. Сер. геологическая. 1983. № 2. С. 96–100.
13. Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П. Оценка температурных условий образования НАСП и GASP стекол лунного реголита // Геохимия. 2011. № 3. С. 227–238.
14. Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В., Влотска Ф., Хут Й. Экспериментальное изучение факторов, определяющих состав стекол лунного реголита // Геохимия. 2003. № 5. С. 467–481.
15. Chandran S.R., James S., Santosh M., Yang C.X., Zhang C., Rajesh V.J., Satyanarayanan M., Praveen M.N., Anilkumar Y., Singh S.P., Keerthy S. Geochemical and geochronological evidence of meteorite impact excavating the Archean basement at Lonar Crater, Central India // Lithos. 2021. V. 404–405. id. 106479.
16. Chandran S.R., James S., Aswathi J., Padmakumar D., Marjan T.S., Kumar R.B., Chavan A., Bhandari S., Sajinkumar K.S. A compendium of the best-preserved terrestrial hypervelocity impact crater in a basaltic terrain: The Lonar, India // Earth-Science Rev. 2023. V. 243. id. 104508.
17. Chao E.C.T., Dwornik E.J., Littler J. New data on the nickel-iron spherules from Southeast Asian tektites and their implications // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1964. V. 28. № 6. P. 971–974.
18. Crosta A.P., Koeberl C., Furuie R.A., Kazuo-Vieira C. The first description and confirmation of the Vista Alegre impact structure in the Parana flood basalts of southern Brazil // Meteorit. and Planet. Sci. 2010. V. 45. № 2. P. 181–194.
19. Das Gupta R., Banerjee A., Goderis S., Claeys P., Vanhaecke F., Chakrabarti R. Evidence for a chondritic impactor, evaporation-condensation effects and melting of the Precambrian basement beneath the 'target' Deccan basalts at Lonar crater, India // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2017. V. 215. P. 51–75.
20. Feldman V.I., Sazonova L.V., Mironov Y.V., Kapustkina I.G., Ivanov B.A. Circular structure Logancha as possible meteorite crater in basalts of the Tunguska syncline // XIV Lunar and Planet. Sci. Conf. Abstract. 1983. V. 14. P. 191–192.
21. Fredriksson K., Dube A., Milton D.J., Balasundaram M.S. Lonar Lake, India: An impact crater in basalt // Science. 1973. V. 180. № 4088. P. 862–864.
22. Glass B.P., Fredriksson K., Florensky P.V. Microirghizites recovered from a sediment sample from the Zhamanchin impact structure // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1983. V. 88. Suppl. P. 319–330.
23. Jaret S.J., Phillips B.L., King Jr D.T., Glotch T.D., Rahman Z., Wright S.P. An unusual occurrence of coesite at the Lonar crater, India // Meteorit. and Planet. Sci. 2017. V. 52. № 1. P. 147–163.
24. Komatsu G., Coletta A., Battagliere M.L., Virelli M. Logancha, Russia // Encyclopedic Atlas of Terrestrial Impact Craters. 2019. P. 171–173.
25. Lodders K. Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // Astrophys. J. 2003. V. 591. № 2. P. 1220–1247.
26. Łuszczek K., Krzesińska A.M. Copper in ordinary chondrites: Proxies for resource potential of asteroids and constraints for minimum-invasive and economically efficient exploitation // Planet. and Space Sci. 2020. V. 194. id. 105092.
27. Maloof A.C., Stewart S.T., Weiss B.P., Soule S.A., Swanson-Hysell N.L., Louzada K.L., Garrick-Bethell I., Pous-sart P.M. Geology of Lonar crater, India // Geolog. Soc. Am. Bull. 2010. V. 122. № 1/2. P. 109–126.
28. Masaitis V.L. Impact structures of northeastern Eurasia: The territories of Russia and adjacent countries // Meteorit. and Planet. Sci. 1999. V. 34. № 5. P. 691–711.
29. Mougél B., Moynier F., Koeberl C., Wielandt D., Biz-zarro M. Identification of a meteoritic component using chromium isotopic composition of impact rocks from the Lonar impact structure, India // Meteorit. and Planet. Sci. 2019. V. 54. № 10. P. 2592–2599.
30. Murali A.V., Zolensky M.E., Blanchard D.P. Tektite-like bodies at Lonar crater, India: Implications for the origin of tektites // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1987. V. 92. № B4. P. E729–E735.
31. Nayak V.K. Maskelynite from the Indian impact crater at Lonar // J. Geol. Soc. India. 1993. V. 41. № 4. P. 307–312.
32. Nickel E.H. Solid solutions in mineral nomenclature // Mineralogy and petrology. 1992. V. 46. № 1. P. 49–53.
33. Osae S., Misra S., Koeberl C., Sengupta D., Ghosh S. Target rocks, impact glasses, and melt rocks from the Lonar impact crater, India: Petrography and geochemistry // Meteorit. and Planet. Sci. 2005. V. 40. № 9/10. P. 1473–1492.
34. Pittarello L., Nestola F., Viti C., Crósta A.P., Koeberl C. Melting and cataclastic features in shatter cones in basalt from the Vista Alegre impact structure, Brazil // Meteorit. and Planet. Sci. 2015. V. 50. № 7. P. 1228–1243.

35. *Reid A.M., Park F.R., Cohen A.J.* Synthetic metallic spherules in a Philippine tektite // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1964. V. 28. № 6. P. 1004–1010.
36. *Ray D., Misra S.* Contrasting aerodynamic morphology and geochemistry of impact spherules from Lonar crater, India: Some insights into their cooling history // *Earth, Moon, and Planets*. 2014. V. 114. P. 59–86.
37. *Ray D., Upadhyay D., Misra S., Newsom H.E., Ghosh S.* New insights on petrography and geochemistry of impactites from the Lonar crater, India // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2017. V. 52. № 8. P. 1577–1599.
38. *Schmieder M., Kring D.A.* Earth's impact events through geologic time: A list of recommended ages for terrestrial impact structures and deposits // *Astrobiology*. 2020. V. 20. № 1. P. 91–141.
39. *Schulz T., Luguet A., Wegner W., van Acken D., Koeberl C.* Target rocks, impact glasses, and melt rocks from the Lonar crater, India: Highly siderophile element systematic and Sr–Nd–Os isotopic signatures // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2016. V. 51. № 7. P. 1323–1339.
40. *Sen G., Chandrasekharam D.* Deccan traps flood basalts province: An evaluation of the thermochemical plume model // *Topics in igneous petrology* / Eds: Ray J., Sen G., Ghosh B. Berlin: Springer, 2011. P. 29–53.
41. *Son T.H., Koeberl C.* Chemical variation in Lonar impact glasses and impactites // *GFF*. 2007. V. 129. № 2. P. 161–176.
42. *Steele R.C., Coath C.D., Regelous M., Russell S., Elliott T.* Neutron-poor nickel isotope anomalies in meteorites // *Astrophys. J.* 2012. V. 758. № 1. id. 59.
43. *Vasconcelos M.A.R., Rocha F.F., Crósta A.P., Wünnemann K., Güldemeister N., Leite E.P., Ferreira J.C., Reimold W.U.* Insights about the formation of a complex impact structure formed in basalt from numerical modeling: The Vista Alegre structure, southern Brazil // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2019. V. 54. № 10. P. 2373–2383.
44. *Wasson J.T., Kallemeyn G.W.* Compositions of chondrites // *Phil. Transact. Roy. Soc. London. Ser. A // Mathemat. and Phys. Sci.* 1988. V. 325. № 1587. P. 535–544.