

УДК 552.652-468

САМОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ РЯДА НИКЕЛЬ–ЖЕЛЕЗО ИЗ ИМПАКТИТОВ КРАТЕРА ЛОНАР (ИНДИЯ) И РЕГОЛИТА ЛУНЫ

© 2023 г. Т. А. Горностаева^а, *, П. М. Карташов^а, А. В. Мохов^а,
А. П. Рыбчук^а, А. Т. Базилевский^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: tagorn8@mail.com

Поступила в редакцию 10.02.2023 г.

После доработки 22.02.2023 г.

Принята к публикации 25.02.2023 г.

Кратер Лонар (Индия) является наиболее сохранившимся и наиболее изученным на Земле, образованным в базальтах, что позволяет проводить сравнительное изучение с импактными преобразованиями минерального вещества на Луне и других планетах Солнечной системы. Как показали сравнительные исследования, материал ударника, как на Земле, так и на Луне, присутствует в импактитах не только в геохимически рассеянном виде, как считалось ранее, но и в форме отдельных субмикронных частиц, распределенных в расплавленном материале мишени. В расплавных импактитах кратера Лонар обнаружены частицы самородного никеля, тэнита и высоконикелевого камасита, которые, видимо, являются преобразованным материалом ударника. Высоконикелевые субмикронные металлические включения широко распространены в импактитах кратера Лонар, поскольку они были обнаружены во всех изученных препаратах, изготовленных из материалов, собранных из разных точек по краю кратера. Обнаруженные в настоящем исследовании высоконикелевые частицы являются дополнительным аргументом в пользу ранее высказанного предположения о хондритовом типе ударника.

Ключевые слова: Луна, Луна-16, Луна-24, импактиты, кратер Лонар, самородный никель, тэнит, камасит, ударник, импактные стекла

DOI: 10.31857/S0320930X23040035, EDN: RDZGEA

ВВЕДЕНИЕ

Кратер Лонар расположен на базальтовых потоках плато Декан, шт. Махараштра, округ Булдана, Индия (19°59' с.ш., 76°31' в.д.) (рис. 1). Достаточно хорошая сохранность кратера Лонар и доступность для изучения делает его уникальным объектом для сравнительного исследования импактных преобразований минерального вещества как ударника, так и мишени на Луне и других планетах и спутниках.

Кратер Лонар представляет собой круглую в плане депрессию диаметром около 1800 м и глубиной около 150 м, окруженную валом с высотой над окружающей равниной около 20 м. На дне кратера находится мелководное соленое озеро (Fredriksson и др., 1973). Абсолютный возраст кратера Лонар, определенный Ar-Ar методом в ударном стекле из выбросов из этого кратера, составляет 0.576 ± 0.047 млн лет (Schmieder, Kring, 2020).

Научная общественность узнала о существовании кольцевой структуры Лонар в 1823 г. из доклада британского офицера С.Дж. Александера (https://earthobservatory.nasa.gov/images/8654/lonar-

crater-india). Сначала кратер Лонар считался вулканическим образованием и дискуссии о его происхождении не прекращались в течение многих лет (Lafond, Dietz, 1964; Pal, Ramana, 1972; Crawford, 1983; Subrahmanyam, 1985). Спор удалось разрешить в 1970-х годах после масштабного бурения, а также геофизических и геохимических исследований, проведенных Геологической службой Индии (Fredriksson и др., 1973). Его импактная природа была подтверждена находками конусов разрушения, импактных стекол, маскелинита (Fredriksson и др., 1973; Murali и др., 1987; Nayak, 1993), а также недавно и коэсита (Jaret и др., 2017). Однако стоит отметить, что некоторые исследователи продолжают считать его вулканическим (Gore и др., 2021). В кратере Лонар помимо импактных стекол обнаружены тектитоподобные стеклянные сферулы и частицы аэродинамической формы размером от ~0.3 до 1 мм (Misra и др., 2009).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Значительная часть приводимой ниже информации о геологическом строении кратера Лонар



Рис. 1. Аэрофото кратера Лонар (источник: <https://i.redd.it/b7dk1zrt8rw01.jpg>). Вид на северо-восток. За кратером виден поселок Лонар. По гребню вала кратера проложена дорога.

заимствована из работ Fredriksson и др. (1973) и Maloof и др. (2010). Эти авторы провели полевые работы на внутренних и внешних склонах кратера и в его окрестностях, и использовали в своем исследовании результаты бурения с баржи трех скважин глубиной от 300 до 350 м на дне кратера, а также изучение шурфов. Скважины прошли примерно 100-метровую толщу озерных осадков, а ниже — через толщу чередования двух видов брекчий — грубозернистых (обломки поперечником до нескольких метров) и микробрекчий (обломки поперечником от сантиметров до нескольких микронов). В каждой из трех скважин было по два интервала протяженностью в десятки метров, из которых керн получить не удалось. Предполагается, что породы на этих интервалах представлены слабосцементированными микробрекчиями.

С учетом результатов бурения, глубина кратера Лонар — от гребня вала до подошвы озерных отложений — составляет 200–220 м и, соответственно, отношение глубины к диаметру близко к 0.1–0.12.

На валу кратера и за его пределами на удалении от 400 до 1200 м находятся выбросы из кратера (Maloof и др., 2010) (рис. 2), тоже представленные, в основном, двумя типами пород: грубозернистыми брекчиями и микробрекчиями. В обломках, составляющих грубозернистые брекчии, наблюдаются конусы сотрясения — текстуры, типичные для относительно слабо деформированных пород ударных кратеров (см., например, French, 1998). В микробрекчиях обломки характеризуются различной степенью ударного метаморфизма, что хорошо заметно на зернах входящего в состав базальтов плагиоклаза: от дробления,

уменьшения степени оптического двупреломления, до образования планарных структур и далее до образования маскеленита.

В выбросах из кратера также встречаются черные стекла базальтового состава. Они варьируют по размеру от уплощенных образований поперечником до 10–15 см до частиц миллиметрового и субмиллиметрового размера, среди которых нередко шарики и каплевидные формы, аналогичные микротектитам (Maloof и др., 2010).

МЕТОДЫ И ОБРАЗЦЫ

В настоящей работе акцент был сделан на высоколокальные методы аналитической электронной микроскопии. Использовались сканирующие электронные микроскопы (СЭМ) JSM-5610 (Япония) и Mira-3 (Чехия). Оба прибора оснащены аналитическими энергодисперсионными рентгеновскими спектрометрами (ЭДС) Oxford Aztec с детекторами Max-100.

В качестве объекта исследования изучены образцы стекол из ударного кратера Лонар. Эти образцы были собраны в 1983 г. в выбросах из кратера сотрудниками ГЕОХИ АН СССР А.Т. Базилевским и М.А. Назаровым (Базилевский, Назаров, 1983) (рис. 2).

В настоящем исследовании было изучено 22 образца из точек отбора, соответствующих номерам 5, 7, 10 и 15 (рис. 2) на схематической карте кратера. Образцы исследовались как в виде аншлифов, так и в виде небольших сколов образцов неправильной формы. Напыление для стекания заряда производилось углеродом.

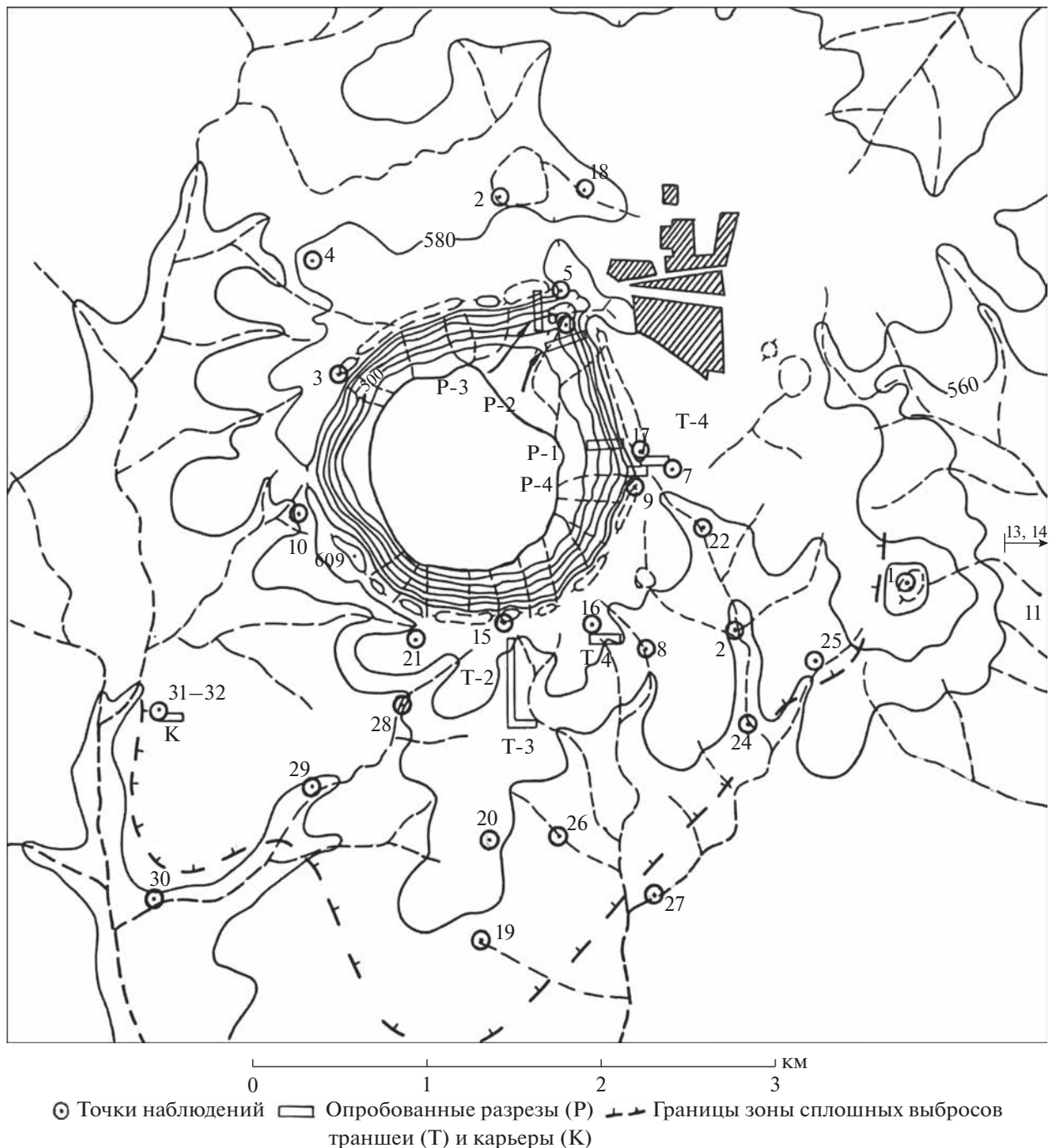


Рис. 2. Схематическая карта кратера Лонар с местами отбора образцов (по статье Базилевский, Назаров, 1973) с дополнением по статье (Maloof и др., 2010).

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

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью настоящего исследования являлось расширение представлений о поведении метео-

ритного вещества в ударных процессах. Задачей исследований были поиск и диагностика минеральных фаз, с наибольшей вероятностью имеющих космогенное происхождение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках поиска конденсатных частиц в пробах импактитов кратера Лонар были детально ис-

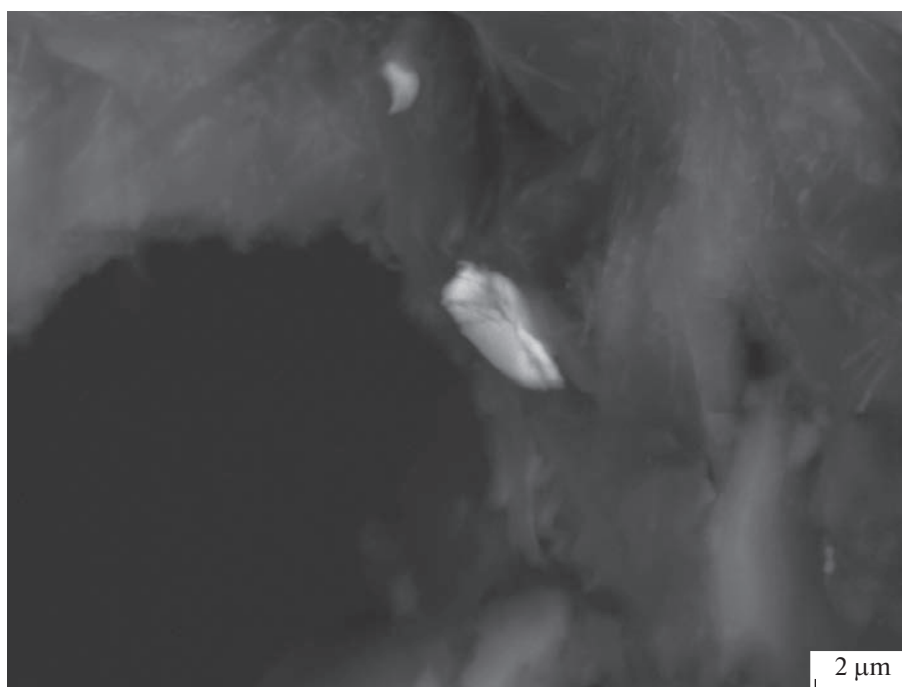


Рис. 3. Частица самородного никеля в матрице импактного стекла. Кратер Лонар. Образец из точки отбора № 10 на рис. 2. СЭМ, отраженные электроны.

следованы большие массивы образцов расплавленного стекла. В одном из его фрагментов в режиме отраженных электронов было обнаружено 2-микронное зерно самородного никеля. Оно было заключено в матрице на сколе неправильной формы крупной частицы расплавленного, частично раскристаллизованного стекла (рис. 3). Карты распределения элементов подтвердили отсутствие других элементов, кроме никеля, в том числе кислорода и железа (рис. 4). Наклон частицы в сторону детектора ЭДС не позволил выполнить количественный анализ ее состава, однако способствовал качественной идентификации элементов. Размеры и форма хорошо коррелируют с фрагментами частицы самородного никеля, найденного в лунном реголите и описанного Карташовым с соавторами (2010) (рис. 5).

Еще один сросток из двух частиц неправильной формы самородного никеля размером около 2 мкм обнаружен среди листовидных агрегатов самородного железа (рис. 6). Карты распределения элементов, полученные в характеристическом рентгеновском излучении (рис. 7), демонстрируют отсутствие кислорода в них (кислород коррелирует только с силикатной стеклянной матрицей), что подтверждает факт самородного состояния как железа, так и никеля. Особо следует отметить, что листовидный агрегат самородного железа морфологически очень близок к таким же агрегатам самородного железа, обнаруженным в лунном реголите из моря Кризисов (рис. 8).

Никель, его высокие содержания в продуктах импактов, часто служит критерием космогенно-

сти анализируемого материала, иллюстрацией чего являются многочисленные данные по составу метеоритного вещества. В ходе нашего исследования импактных стекол кратера Лонар также были обнаружены фрагменты металлического железа с высоким содержанием никеля. Так на рис. 9 приведен снимок частицы размером около 5 мкм неправильной формы, что хорошо видно на правом снимке в отраженных электронах. Левый снимок во вторичных электронах подтверждает факт того, что частица закрыта матрицей расплавленного стекла. Тогда как на снимке в отраженных электронах она четко видна благодаря высокому ускоряющему напряжению в 25 кВ, позволяющему потоку электронов проникать достаточно глубоко в матрицу и формировать поток отраженных электронов от обнаруженной частицы, зарегистрированный детектором. Рентгеновский спектр этой частицы (рис. 10) содержал набор пиков, характерных для стеклянной матрицы, и интенсивные пики железа и никеля. Количественный расчет нескольких таких спектров, снятых с разворотом образца по отношению к детектору для нивелирования эффекта неправильной ориентации частицы и учета силикатной составляющей, показал, что обнаруженная частица является тэнитом состава $\text{Fe}_{1.89}\text{Ni}_{1.11}$, при содержании 38.2 мас. % Ni. Этот минерал характерен для метеоритов и, скорее всего, может служить индикатором космогенного происхождения, являясь фрагментом ударника.

Помимо тэнита с высоким содержанием никеля, была обнаружена и еще одна двухмикронная железо-никелевая частица с содержанием этого

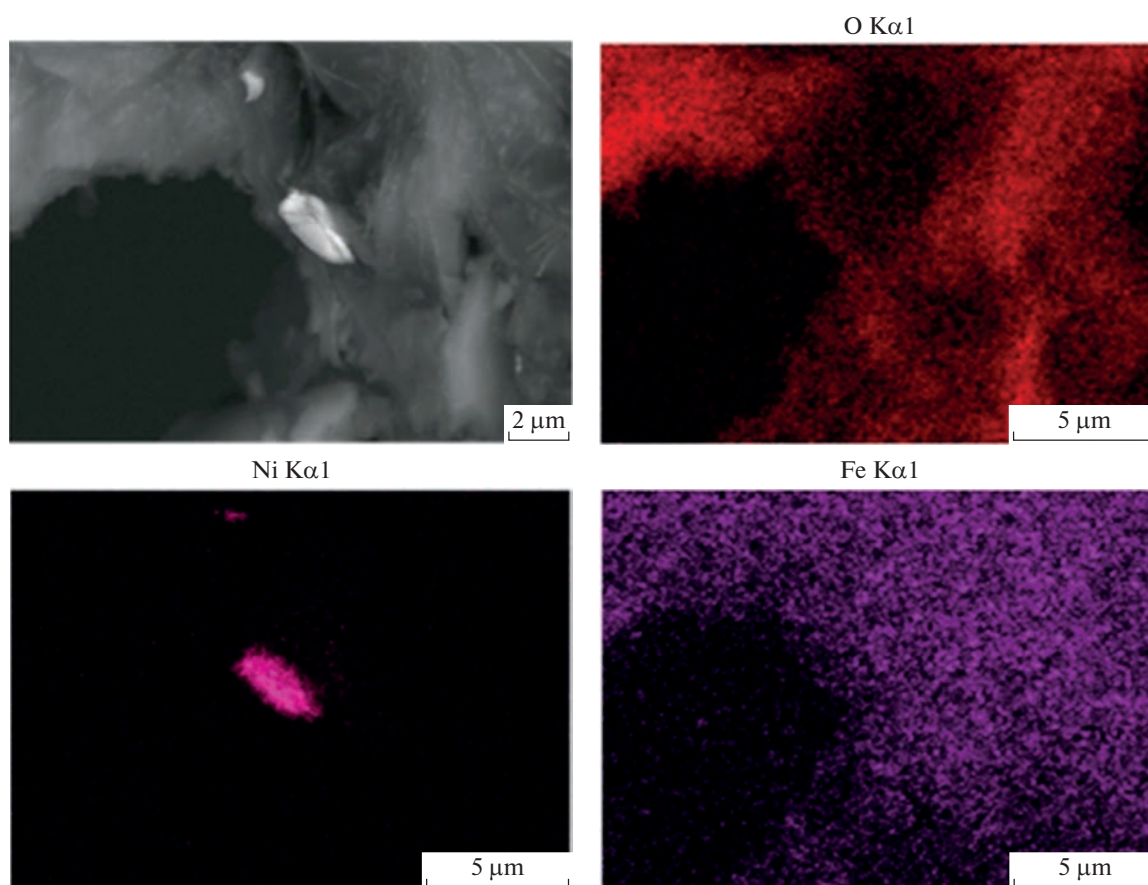


Рис. 4. Карта распределения элементов по участку образца, представленного на рис. 3. Кратер Лонар. СЭМ, отраженные электроны, рентгеновское характеристическое излучение.

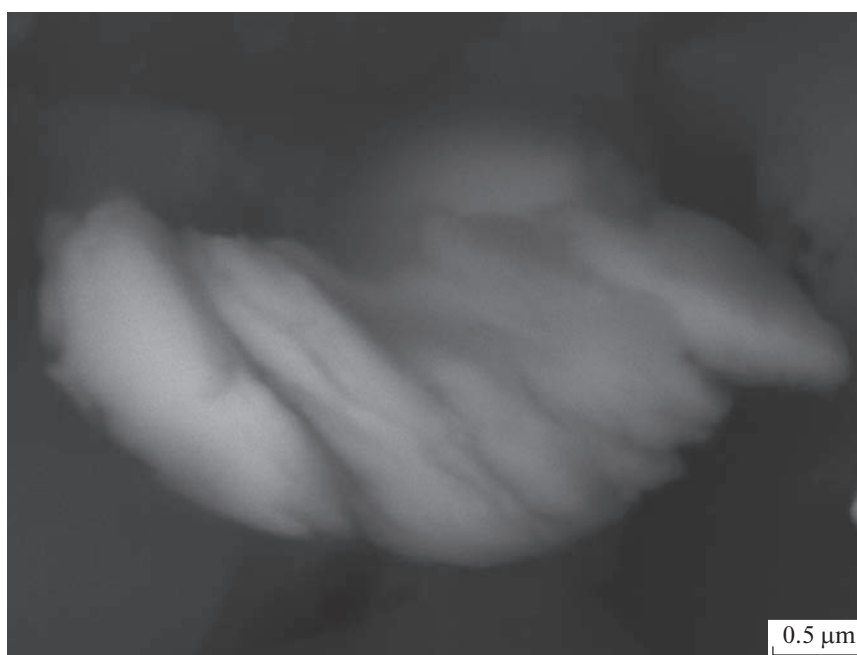


Рис. 5. Частица самородного никеля из пробы реголита из Моря Кризисов (Карташов и др., 2010). Луна-24. СЭМ, отраженные электроны.

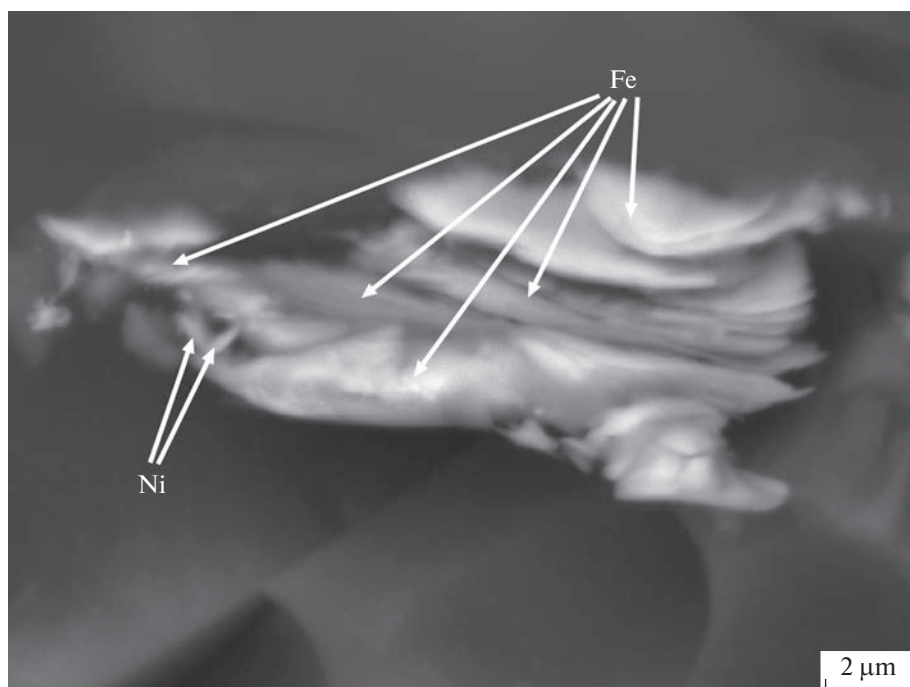


Рис. 6. Сrostок частиц самородного Ni на листовидном агрегате частиц самородного Fe. Кратер Лонар. Образец из точки отбора № 7, рис. 2. СЭМ, отраженные электроны.

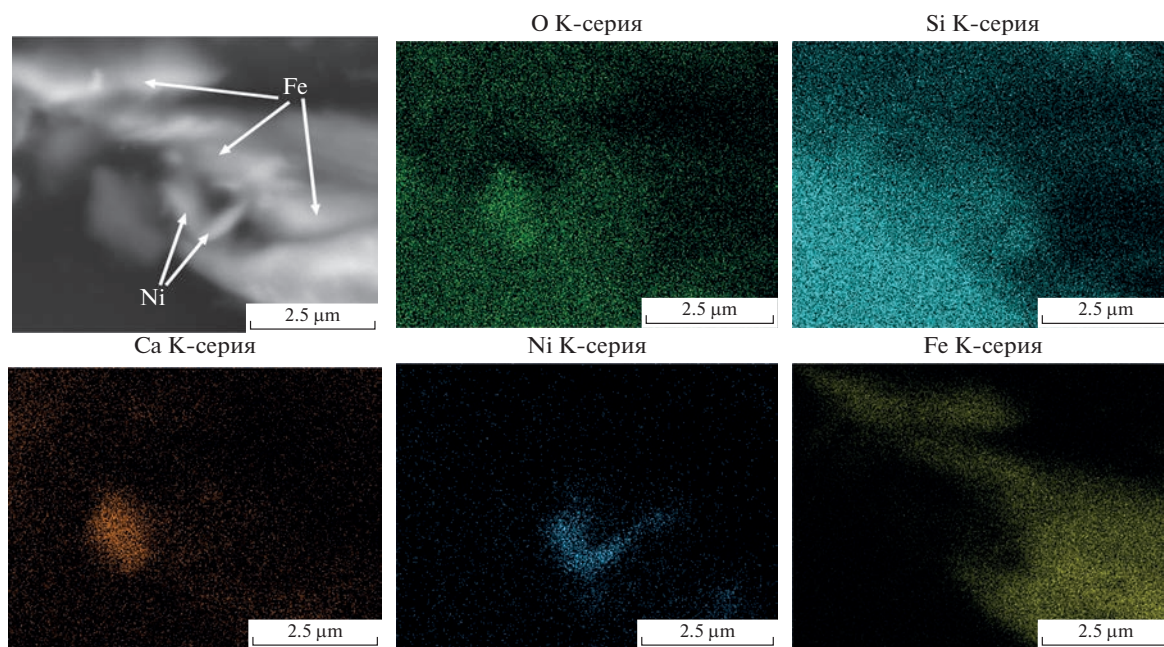


Рис. 7. Карта распределения элементов по участку образца, представленного на рис. 6. Кратер Лонар. Образец из точки отбора № 15, рис. 2. СЭМ, отраженные электроны, рентгеновское характеристическое излучение.

металла 9.3 мас. % (рис. 11). Такой состав характерен для камасита, который может содержать до 22 мас. % Ni (Новгородова, 1994), но максимум встречаемости в метеоритных камаситах приходится на 5–6 мас. % (Печерский и др., 2011).

ОБСУЖДЕНИЕ

Остатки вещества ударника, как известно из литературы, могут сохраняться в виде неизмененных частиц, либо, как это принято считать, геохимически рассеяны. Фрагменты метеоритного ве-

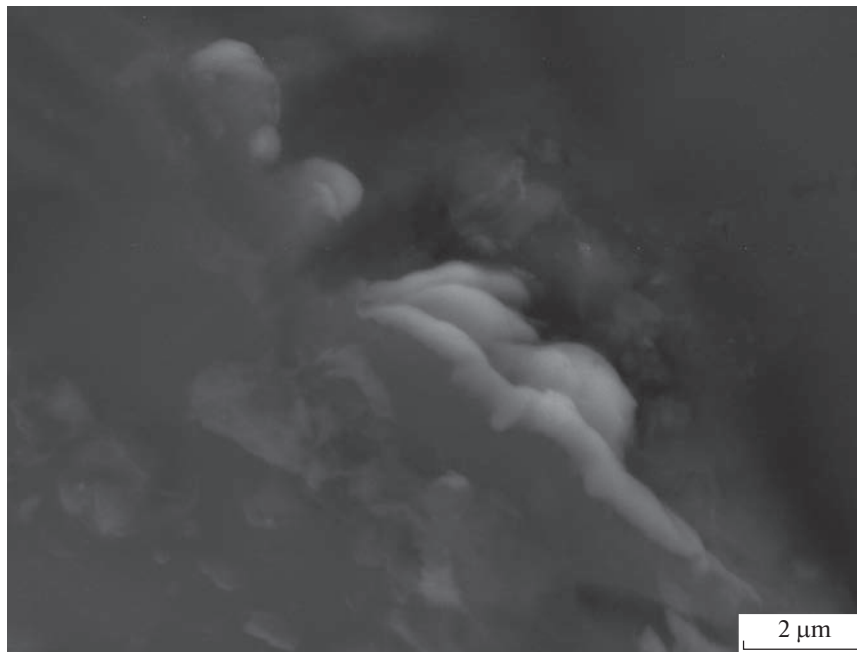


Рис. 8. Листовидное самородное железо в лунном реголите из образцов АС Луна-16. СЭМ, отраженные электроны.

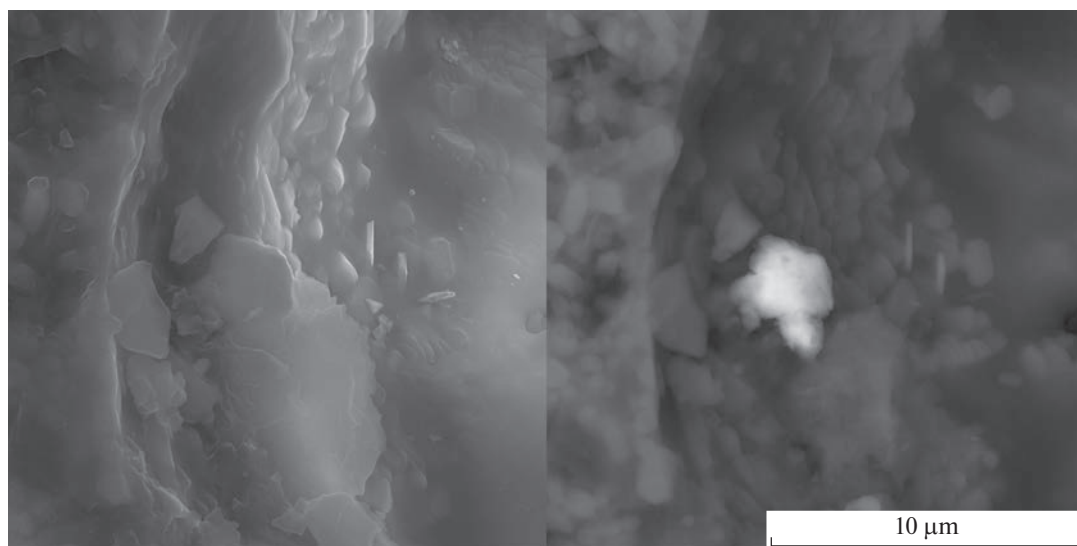


Рис. 9. Частица тэнита в импактном стекле кратера Лонар. Образец из точки отбора № 5, рис. 2. Слева — вторичные электроны. Справа — отраженные электроны. СЭМ.

щества обнаружены только в небольших ударных кратерах, в основном образованных в результате падения железных метеоритов как, например, кратер Камилль в Египете (D'Orazio и др., 2011), кратер Вабар в Саудовской Аравии (Mittlefehldt и др., 1992), а также кратер Метеор в Аризоне, США (Mittlefehldt и др., 2005). Стоит отметить, что обнаруженные фрагменты метеоритов в перечисленных кратерах сильно преобразованы, в том числе частично переплавлены. В случае, когда нет вещественных доказательств присутствия мате-

риала ударника, используется оценка концентраций сидерофильных элементов-индикаторов, таких как Fe, Ni, Co и Cr, а также элементов платиновой группы (PGE) по валовым содержаниям в расплавных импактитах (Palme и др., 1981). Выбор элементов продиктован большим их содержанием в метеоритах по сравнению с земными породами.

Еще одним маркером метеоритного вещества в импактных стеклах являются субмикронные металлические сферулы, которые часто фиксируются

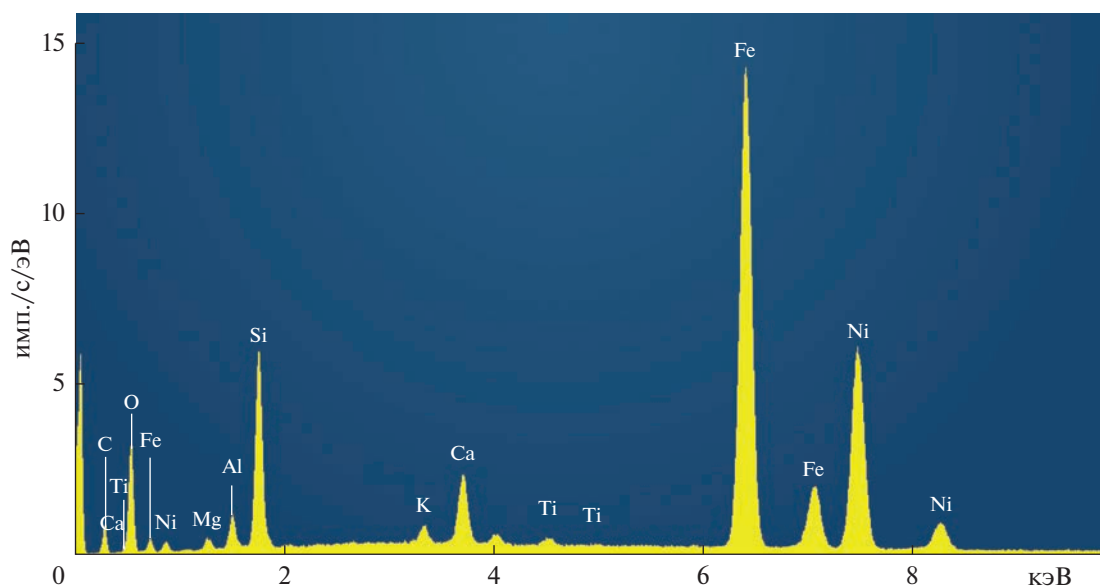


Рис. 10. Рентгеновский спектр, зафиксированный от частицы тэнита, представленного на рис. 9. Кратер Лонар.

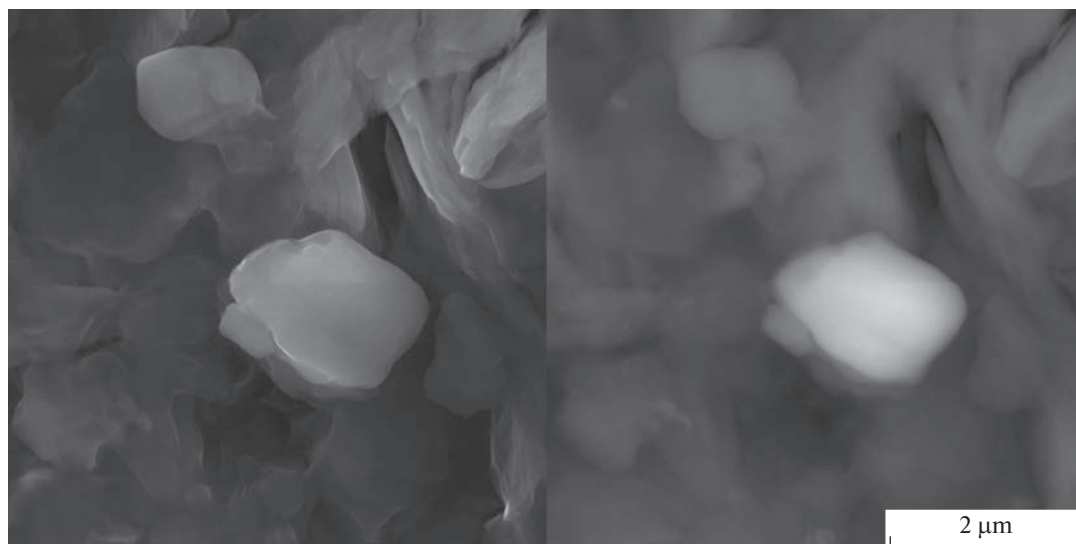


Рис. 11. Частица камасита в импактном стекле кратера Лонар. Слева — вторичные электроны. Образец из точки отбора № 7, рис. 2. Справа — отраженные электроны. СЭМ.

лись в качестве включений в тектитах, а также в ряде импактитов. Так в тектитах металлическое железо было обнаружено в виде железных шариков (Thorpe, Senftle, 1964). Однако отсутствие в составе таких шариков никеля указывало на их метеоритное происхождение (Kleinmann, 1969). Противоположная ситуация была в случае обнаружения сферул, обогащенных сидерофильными элементами, в частности Ni. Это связано с тем, что вещество метеоритов обогащено Fe—Ni фазами (камаситом и тэнитом) (например, Palme и др., 1981). Сферулы, состоящие из камасита с содер-

жанием Ni 10—13 мас. % с примесью шрейберзита и троилита, были обнаружены в филиппинитах и индошинитах (Chao и др., 1964). Похожие по составу сферулы были обнаружены в импактитах Вабар и Аризонского метеоритного кратера (Reid и др., 1964; Chao и др., 1964). В иргизитах также были обнаружены металлические Ni—Fe сферулы (Glass и др., 1983). Во всех этих случаях обнаруженные сферулы интерпретировали как фрагменты ударника, преобразованные в результате совместного плавления с материалом мишени.

В кратере Лонар были обнаружены тектитоподобные стеклянные сферулы, однако в них не было зафиксировано металлических никельсодержащих включений (Misra и др., 2009). В то же время, по сравнению с базальтами коренных пород, в них были зафиксированы более высокие содержания Fe_2O_3 (~1.5 мас. %) и Ni (~1000 ppm). Такое содержание Ni в них в 14 раз больше, чем в базальтах, что объяснялось авторами (Misra и др., 2009) присутствием метеоритного вещества в этих стеклянных сферулах. Приведенные результаты совпадают с геохимическими сравнительными данными по составу пород мишени и импактитов. Так по данным (Osae и др., 2005) содержание Ni в базальтах мишени составляет 90 ppm, в расплавных импактитах — 86 ppm, в стеклянных сферулах — 132 ppm. Стоит отметить исследование Kearsley и др. (2004), которые сообщили о находке в порах расплавных импактитов маленьких (<10 мкм) железо—никелевых частиц с широким диапазоном колебаний соотношений Fe/Ni, составляющим 0.02 — 14.4. По предположению авторов (Kearsley и др., 2004), они являются металлическими остатками, образующимися в процессе фракционирования при ударе. В то же время, по данным (Son, Koeberl, 2007) при изучении довольно большого количества расплавных импактных стекол не было найдено ни одной железо—никелевой частицы, а содержание Ni было ниже или около предела обнаружения ЕРМА (~0.02 мас. %).

Идентификация никельсодержащих частиц в импактитах позволила во многих случаях определить присутствие вещества ударника, однако до сих пор остается непонятным, как вещество ударника распределяется в материале мишени, а также формы его выделения. Интересными являются сравнительные исследования импактитов и вещества упавших метеоритов. При изучении импактитов кратера Метеор обнаружили, что металлические шарики обогащены Co, Ni, Ir и Au по сравнению с материалом упавшего метеорита (Mittlefehldt и др., 2005). Ebert и др. (2013) провели сравнение металлических шариков, обедненных железом, с исходным метеоритным отношением для кратеров Вабара, Монтураки и Метеор. Было установлено, что отношение Ni/Co в этих сферулах более высокое по сравнению с исходным в ударнике за счет увеличения содержания Ni.

С целью выяснения поведения Ni и Fe в импактном процессе был проведен эксперимент с использованием сферы, выточенной из железного метеорита в качестве снаряда. В результате было показано, что Fe ударника преимущественно распределяется в расплаве мишени, что нельзя сказать о Ni и Co. Такое фракционирование, по мнению Ebert и др. (2013) является следствием различных свойств сидерофилов, в частности, различного характера взаимодействия Fe, Ni и Co с кислородом во время импакта. Одним из механизмов фракционирования железа может слу-

жить процесс термовосстановления (Яковлев и др., 2003). При размере металлических капель импактно преобразованного ударника менее 3 мкм более заметно их обогащение Ni, Co, P на фоне обеднения железом. Ebert и др. (2013) зафиксировали частичное плавление ударника, так как расчетное максимальное ударное давление в ходе эксперимента не превышало 55 ГПа. Однако, как было показано при численном моделировании образования кратера Метеор (Artemieva, Pierazzo, 2011), начало плавления метеорита происходило при давлении около 162 ГПа, а испарение около 320 ГПа. Видимо, энергетики импакта в описанном выше эксперименте было недостаточно для полного плавления и испарения материала ударника, но, несмотря на это, зафиксированы тенденции в поведении составляющих его элементов.

В случае обнаруженного в настоящем исследовании самородного никеля (рис. 3 и 6) мы наблюдаем сrostок двух линзовидных пластинок — фрагмент “книжечки”, подобной агрегату никеля из Моря Кризисов (рис. 8). Другая лентовидная частица никеля нарастает на “книжечку” безникелевого железа (рис. 6) и, по-видимому, образовалась после нее. Таким образом, его происхождение представляется нам связанным с конденсацией испаренного вещества ударника на фронте ударной волны. В ходе этого процесса динамического испарения-конденсации внутри расширяющегося высокотемпературного газо-плазменного облака происходило фракционирование никеля от железа. Такой механизм образования в целом совпадает с наблюдениями и экспериментальными результатами (Ebert и др., 2013).

Взаимосвязь компактных металлических микрочастиц с космогенным веществом (ударником) может быть двоякой: они могут быть либо фрагментами непосредственно самого ударника, либо продуктами преобразования (в результате плавления, испарения/конденсации) таких фрагментов. Легче всего распознать космогенное вещество первого типа, когда оно представлено хрупкими минералами, например, фосфидами железа—никеля — шрейберзитом, барринджеритом и т.п., как в случае с астроблемами Цэнхэр и Жаманшин (Салтыковский и др., 2011; Горностаева и др., 2018). Пластичные сплавы ряда железо—никель сохраняют исходную форму частиц гораздо реже, но тем не менее имеют в различной степени искаженный изометричный или линзовидный габитус. Переплавленные космогенные металлы легко узнаваемы и представлены различного размера сфероидными отликвированными от стеклянной матрицы (Chao и др., 1964), а также разнообразными каплевидными индивидами, свободными или наплавленными на минеральный/стеклянный субстрат (Салтыковский и др., 2011). Признаком металлических конденсатов испаренного в результате импакта вещества являются металлические пленки на стеклянных частицах, неодно-

кратно отмечавшиеся в лунном реголите (FrondeL, 1975; Карташов и др., 2010).

В случае кратера Лонар определенную сложность представляет вероятное обнаружение металлических железо-никелевых фаз, образованных в исходных базальтах мишени. Так известны находки самородного никеля в фумарольных эсгалатах в базальтовых шлаковых конусах Большого Трещинного Толбачинского Извержения 1978 г. (БТТИ-78) (Главатских, Трубкин, 2003). Там он образует пластинчатые индивиды до 1.1 мм размером, представленные никелем высокой чистоты (99.4–100 мас. %) причем главной примесью к никелю является не железо, а медь. Большинство находок теллурического железа и камасита приурочено к базальтам и, часто, к трапповым (Trieiman и др., 2002; Гриценко, Полушкина, 2020), где они образуют каплевидную вкрапленность, часто в тесной ассоциации с графитом, когенимом и самородной медью. Причем размер отдельных сферических капель может колебаться от сотен микрон до 10 см в диаметре. Самородное железо кратера Лонар представлено своеобразными агрегатами субпараллельных пластинок, так называемыми “книжечками”. Предположительно, такие агрегаты возникают в ходе распространения взрывной волны. Обильные находки самородных металлов и интерметаллидов с такой морфологией ранее встречались в линейных микродислокациях, сопровождающих прорыв через осадочный чехол кимберлитовых трубок (Макеев и др., 2002). Индивиды чистого самородного железа схожего облика обнаружены и в лунном реголите (рис. 8). Таким образом, имеются веские основания предполагать, что обнаруженные нами на Лонаре “книжечки” самородного железа образовались на фронте ударной волны при импакте. Причем, скорее всего, источником вещества для них послужили базальтовые породы мишени.

Обнаруженная нами частица камасита по содержанию никеля заметно превосходит не только образцы камаситов из земных базальтов (массивы Хунгтукун, Джелтула, Маймечя и острова Дисло) (Trieiman и др., 2002; Гриценко, Полушкина, 2020) и при этом не содержит кобальта в пределах обнаружения метода, но и статистический максимум никелевости метеоритного камасита (Печерский и др., 2011). С одной стороны, это может свидетельствовать о происхождении данного зерна из железо-каменного или каменного метеорита, с другой стороны, о фракционном обогащении никелем в ходе импактной переработки обычного метеоритного камасита, отвечающего статистическому максимуму. Действительно, форма данной частицы одновременно и массивно изометричная, напоминая фрагмент, возникший при простом механическом дроблении ударника, и в то же самое время имеет явные черты расщепления с переходом в классическую “книжечку” (агрегат листочков), типичную для индивидов, образовавшихся в ходе ударных нагрузок.

Тэнит не характерен для земных базальтоидов, но, тем не менее, иногда встречается в них (Nauyak, Meyer, 2015; Гриценко, Полушкина, 2020). Типичной особенностью состава этих тэнитов является высокое совместное содержание никеля (5–8 мас. %) и меди (2–3 мас. %). В то же время низкокобальтовый тэнит является типичным минералом метеоритов, причем, по данным (Печерский и др., 2011), максимально распространенным именно в каменных метеоритах. Так тэнит обнаружен во всех изученных ими каменных метеоритах при среднем его содержании 1.5 мас. % и средней концентрации в нем никеля 49.3 мас. % (Печерский и др., 2011). Морфология тэнита (рис. 9), обнаруженного нами в кратере Лонар, изометрично-обломочная, то есть этот тэнит мог бы быть прямым продуктом дезинтеграции ударника.

Таким образом, в импактных брекчиях кратера Лонар нами выявлены индивиды космогенных и земных металлов ряда железо-никель с признаками образования в результате проявления разных механизмов, но однозначно обязанные своим происхождением импактному событию.

Стоит отметить, что оценка валовых содержания элементов-индикаторов является неэффективным методом поиска и идентификации типа ударника. Горностаева и др. (2018) применили оригинальный подход к поиску вещества импактора. Комплексное использование методов электронной сканирующей микроскопии позволило авторам обнаружить субмикронные частицы внеземного вещества, распределенные в расплавленных импактатах. Причем такие частицы были найдены в разных образцах импактных стекол кратера Жаманшин. Выявленные таким же комплексным методом высоконикелевые субмикронные металлические включения широко распространены в импактатах кратера Лонар, поскольку они были обнаружены во всех изученных препаратах, изготовленных из материалов, собранных из разных точек кольцевого вала кратера.

Интересно отметить, что самые крупные выделения высоконикелевых металлических фаз были обнаружены на неполированных препаратах, тогда как в аншлифах их выделения были меньше на порядок. Из этого можно сделать вывод о том, что крупные листоватые агрегаты приурочены к неким трещинам или ослабленным зонам породы, по которым осуществлялась циркуляция металлоносных флюидов. При раскалывании породы велика вероятность, что раскол произойдет именно по таким ослабленным зонам.

Изучение земных импактных кратеров, являющихся результатом одноактных событий, позволяет изучать преобразование вещества ударника и экстраполировать эти данные на другие планеты. В случае же с лунным реголитом, который является результатом многократных импактов, мы можем сталкиваться с многократным преобразованием вещества ударника. Однако мы также

фиксируют субмикронные частицы с высоким содержанием никеля в частицах лунного реголита.

Попытки определить тип ударника, образовавшего кратер Лонар, проводились на основе геохимического анализа импактитов. С хондритовым типом ударника соглашаются многие авторы, однако по содержанию метеоритного компонента в импактитах мнения расходятся. При анализе стеклянных импактных сферул размером $\sim 0.3\text{--}1$ мм было зафиксировано высокое содержание Cr, Co и Ni, которое Misra и др. (2009) связывают с тем, что ударником в кратере Лонар был хондрит, содержание которого в микронных и субмикронных тектитоподобных шариках составляет от 12 до 20 мас. %. Позднее анализ субмикронных сферул на содержание Cr, Co и Ni позволил авторам уточнить, что ударником был хондрит EH-типа, однако его доля составляет ~ 6 мас. % (Ray и др., 2017). По данным (Schulz и др., 2016) в импактных стеклах и расплавленных породах присутствует не более 0.03% хондритного компонента. Изотопный состав Cr в ударных породах кратера Лонар показал присутствие хондритового компонента в количестве до 3%, который, скорее всего, был CM-хондритом (Mougel и др., 2019). Интересно отметить, что Osae и др. (2005) не выявили метеоритный компонент в объемных образцах ударных стекол. Это, по мнению Osae и др. (2005), указывает либо на незначительную контаминацию импактитов материалом ударника, либо на нехондритовый его тип.

Обнаруженные в настоящем исследовании самородный никель, а также тэнит и высоконикелевый камасит могут свидетельствовать о хондритовом типе ударника. Так обычно хондриты содержат от 1 до 12% металла (Zanda и др., 2006) с концентрацией 10% Ni. Довольно низкое содержание никеля в силикатах, < 500 ppm (Welten, 1999), означает, что более 95% Ni, присутствующего в хондритах, находятся в металлической фазе.

ВЫВОДЫ

1. Многочисленные железо-никелевые частицы, найденные в образцах из различных точек отбора в кратере Лонар, являются преобразованным материалом ударника.

2. Материал ударника, как на Земле, так и на Луне, присутствует в импактитах не только в геохимически рассеянном виде, как считалось ранее, но и в форме отдельных субмикронных частиц, которые распределены в расплавленном материале мишени.

3. Зафиксированный в настоящем исследовании самородный никель впервые найден на Земле, в природных условиях, очевидно, является результатом глубокого фракционирования элементов в ходе эволюции вещества газо-плазменного облака, что позволяет продвинуться в понимании поведения этих элементов в импактном процессе.

4. Наличие в импактитах микрочастиц самородного никеля, тэнита и высоконикелевого камасита в целом подтверждает гипотезу о хондритовой природе ударника кратера Лонар.

Авторы искренне благодарны О.И. Яковлеву за проведенные консультации.

Работа выполнена за счет бюджетных средств по госзаданию ГЕОХИ РАН в рамках темы “Новые комплексные подходы к фундаментальной проблеме изучения химического состава, трансформации и миграции наночастиц и легкоподвижных форм элементов в окружающей среде”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевский А.Т., Назаров М.А. Отчет о результатах командирования ученых за границу; страна командирования Индия. ГЕОХИ АН СССР, 1983. 16 с.
- Главатских С.Ф., Трубкин Н.В. Самородный теллур и никель из высокотемпературных газовых возгонов Большого Трещинного Толбачинского Извержения (Камчатка) // ДАН. 2003. Т. 389. № 2. С. 231–234.
- Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богати-ков О.А. Космогенное вещество в кратере Жаманшин // ДАН. 2018. Т. 478. № 4. С. 447–451.
- Гриценко Ю., Полушкина С. Проявление самородного железа на реке Маймеча, Красноярский край, Россия // X международный симпозиум “Минеральное разнообразие, исследование и сохранение”. София: Национальный музей “Земля и люди”, 2020. С. 201–206.
- Карташов П.М., Мохов А.В., Горностаева Т.А., Богати-ков 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.
- Макеев А.Б., Кисель С.И., Соболев В.К., Филиппов В.Н., Брянчанинова В.И. Самородные металлы в ореолах кимберлитовых трубок Архангельской алмазоносной провинции // ДАН. 2002. Т. 385. № 5. С. 677–681.
- Новгородова М.И. Кристаллохимия самородных металлов и природных интерметаллических соединений // Итоги науки и техники. Серия кристаллохимия. 1994. Т. 29. 153 с.
- Печерский Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А. Сравнение магнитных минералов в метеоритах и осадках // Двенадцатая Международная конференция “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле”. Москва–Борок 3–6 октября 2011 г. Материалы конференции. Москва, 2011. С. 278–281.
- 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 Международная конференция “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле”. Москва–Борок 3–6 октября 2011 г. Материалы конференции. Москва, 2011. С. 298–302.
- 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.

- Artemieva N., Pierazzo E. The Canyon Diablo impact event: 2. Projectile fate and target melting upon impact // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2011. V. 46. № 6. P. 805–829.
- 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.
- Crawford A.R. Mantle convection pattern under India: Relevance to Lonar crater, Girnar node and peri-Indian volcanism // *J. Geol. Soc. India.* 1983. V. 24. № 2. P. 97–100.
- D'Orazio M., Folco L., Zeoli A., Cordier C. Gebel Kamil: The iron meteorite that formed the Kamil crater (Egypt) // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2011. V. 46. № 8. P. 1179–1196.
- Ebert M., Hecht L., Deutsch A., Kenkmann T. Chemical modification of projectile residues and target material in a MEMIN cratering experiment // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2013. V. 48. № 1. P. 134–149.
- Fredriksson K., Dube A., Milton D.J., Balasundara M.S. Lonar Lake, India: An impact crater in basalt // *Science.* 1973. V. 180. Iss. 4088. P. 862–864.
- French B.M. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures // LPI Contribution № 954. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. 120 p.
- FrondeL J.W. Lunar Mineralogy. New York: Wiley-Interscience, 1975. 332 p.
- 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.
- Gore R., Mishra A., Deshmukh R. Exploring the mineralogy at Lonar crater with hyperspectral remote sensing // *J. Geol. Soc. India.* 2021. V. 97. P. 261–266.
- Jaret S.J., Phillips B.L., King D.T., Jr., Glotch T.D., Rahman Z., Wright S.P. An unusual occurrence of coesite at the Lonar crater, India // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2017. V. 52. № 1. P. 147–163.
- Kearsley A., Graham G., McDonnell T. Bland P., Hough R., Helps P. Early fracturing and impact residue emplacement: Can modeling help to predict their location in major craters? // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2004. V. 39. № 2. P. 247–265.
- Kleinmann B. Magnetite bearing spherules in tektites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1969. V. 33. № 9. P. 1113–1120.
- Lafond E.C., Dietz R.S. Lonar Crater, India, a meteorite crater? // *Meteoritics.* 1964. V. 2. № 2. P. 111–116.
- Maloof A.C., Stewart S.T., Weiss B.P., Soule S.A., Swanson-Hysell N.L., Louzada K.L., Garrick-Bethell I., Poussart P.M. Geology of Lonar crater, India // *Geological Soc. of Am. Bull.* 2010. V. 122. № 1/2. P. 109–126.
- Misra S., Newsom H.E., Shyam Prasad M., Geissman J.W., Dube A., Sengupta D. Geochemical evidence of the impactor for Lonar Crater, India: Solution to a century-old mystery // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2009. V. 44. № 7. P. 1001–1018.
- Mittlefehldt D.W., See T.H., Hörz F. Dissemination and fractionation of projectile materials in the impact melts from Wabar crater, Saudi Arabia // *Meteoritics.* 1992. V. 27. № 4. P. 361–370.
- Mittlefehldt D.W., Hörz F., See T.H., Scott E.R., Mertzman S.A. Geochemistry of target rocks, impact-melt particles, and metallic spherules from Meteor Crater, Arizona: Empirical evidence on the impact process // *Large meteorite impacts III.* Boulder, CO: Geological Society of America, 2005. V. 384. P. 367–390.
- Mougel B., Moynier F., Koeberl C., Wielandt D., Bizzarro M. Identification of a meteoritic component using chromium isotopic composition of impact rocks from the Lonar impact structure, India // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2019. V. 54. № 10. P. 2592–2599.
- 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.
- Nayak V.K. Maskelynite from the Indian impact crater at Lonar // *J. Geol. Soc. India.* 1993. V. 41. № 4. P. 307–312.
- Nayak B., Meyer F.M. Tetrataenite in terrestrial rock // *Am. Mineralogist.* 2015. V. 100. № 1. P. 209–214.
- 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 // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2005. V. 40. № 9/10. P. 1473–1492.
- Pal P.C., Ramana C.V. Lonar lake – volcanic crater or astrophleome // *CEG Bulletin.* 1972. P. 114–121.
- Palme H., Grieve R.A.F., Wolf R. Identification of the projectile at the Brent crater, and further considerations of projectile types at terrestrial craters // *Geochim. et Cosmochim. Acta* 1981. V. 45. № 12. P. 2417–2424.
- Pechersky D.M., Markov G.P., Tsel'movich V.A. Pure iron and other magnetic minerals in meteorites // *Sol. Syst. Res.* 2015. V. 49. № 1. P. 61–71.
- Ray D., Upadhyay D., Misra S., Newsom H.E., Ghosh S. New insights on petrography and geochemistry of impactites from the Lonar crater, India // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2017. V. 52. № 8. P. 1577–1599.
- 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.
- 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.
- 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 // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2016. V. 51. № 7. P. 1323–1339.
- Son T.H., Koeberl C. Chemical variation in Lonar impact glasses and impactites // *GFF.* 2007. V. 129. № 2. P. 161–176.
- Subrahmanyam B. Lonar crater, India: a crypto-volcanic origin // *Geological Soc. India.* 1985. V. 26. № 5. P. 326–335.
- Thorpe A.N., Senftle F.E. Submicroscopic spherules and color of tektites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1964. V. 28. № 6. P. 981–994.
- Trieman A.H., Lindstrom D.J., Schwandt C.S., Franchi I.A., Morgan M.L. A “mesosiderite” rock from northern Siberia, Russia: Not a meteorite // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2002. V. 37. № S12. P. B13–B22.
- Welten K.C. Concentrations of siderophile elements in non-magnetic fractions of Antarctic H- and L-chondrites: A quantitative approach on weathering effects // *Meteoritics and Planet. Sci.* 1999. V. 34. № 2. P. 259–270.
- Zanda B., Hewins R.H., Bourot-Denise M., Bland P.A. Albarède F. Formation of solar nebula reservoirs by mixing chondritic components // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 248. № 3–4. P. 650–660.