

УДК 523.34-36

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИМПАКТНЫЙ КОНДЕНСАТ КРАТЕРА ЛОНАР (ИНДИЯ)

© 2020 г. Т. А. Горностаева^{1,*}, А. В. Мохов¹, А. П. Рыбчук¹,
П. М. Карташов¹, академик РАН О. А. Богатиков¹

Поступило 20.05.2020 г.
После доработки 19.06.2020 г.
Принято к публикации 24.06.2020 г.

Впервые в земном импактном кратере Лонар обнаружен высококальциевый высокотемпературный конденсат. Его находка на практике подтверждает ранее сделанные в литературе теоретические выводы из результатов экспериментов. Обнаруженный в кратере Лонар высококремниевый конденсат, аналогичный найденному в кратере Жаманшин и в лунном реголите, подтверждает отсутствие корреляции между составом мишени и составом импактных конденсатов. Наличие в кольцевых структурах высокотемпературных конденсатных стекол может быть одним из диагностических критериев, позволяющих отличать вулканогенные образования от импактных.

Ключевые слова: кратер Лонар, кратер Жаманшин, лунный реголит, конденсатные стекла, высокотемпературный конденсат, импактные стекла, ПЭМ, ЭДС, наночастицы

DOI: 10.31857/S268673972009008X

ВВЕДЕНИЕ

Характерным признаком высокоэнергетического импакта является наличие процесса, в ходе которого из части газово-плазменного облака, состоящего из вещества в атомарном, ионном, кластерном и молекулярном состоянии, конденсируется ряд наноразмерных агрегатов и пленок. Высокотемпературный интервал конденсационного окна, вызванного быстрым падением температуры и концентрации в разлетающемся газово-плазменном облаке, чрезвычайно краток по времени, от сотых долей до первых секунд и вследствие этого продукты высокотемпературной конденсации имеют размеры, не превышающие нескольких сотен нанометров [1]. Изучение таких природных продуктов имеет, прежде всего, фундаментальное значение для выяснения механизмов формирования Вселенной, процесса конденсации в физике конденсированного состояния, а также оценки последствий атомных взрывов.

Изучение импактитов кратера Лонар и сравнение их с аналогами из кратера Жаманшин и лунным реголитом позволяют наглядно увидеть насколько значимо влияние состава мишени на состав продуктов конденсации.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кратер Лонар является наиболее сохранившимся и изученным на Земле импактным кратером, наложенным на базальтовые породы. Он расположен в Индии, 19°58' с.ш., 76°31' в.д. в Деканской трапповой провинции. Кратер имеет чашеобразную форму с диаметром ~1.88 км и глубиной около 150 м, заполнен мелким соленым озером [2]. Возраст импактитов кратера Лонар ~570000 лет [3]. Происхождение кратера обсуждалось в течение многих лет [4]. Его импактная природа была подтверждена находками ударных структур и материалов, таких как конусы разрушения, импактные стекла, а также маскелинит [2].

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Импактные стекла кратера Лонар из коллекции доктора геолого-минералогических наук А.Т. Базилевского и доктора геолого-минералогических наук М.А. Назарова (ГЕОХИ РАН) были получены из Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (номер каталога МЕТ 97) и непосредственно от А.Т. Базилевского через кандидата геолого-минералогических наук О.И. Яковлева.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поиск продуктов конденсационного процесса, характерных для высокоэнергетического импакта. И, в случае находки таковых, провести

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: avm8okhov@gmail.com

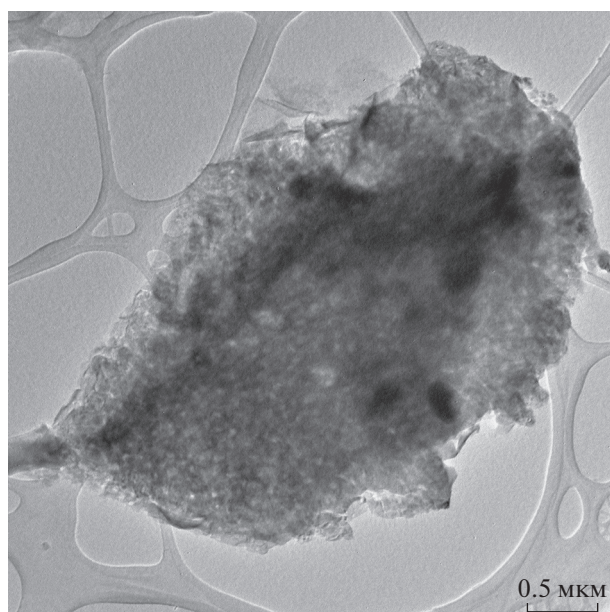


Рис. 1. Высококремниевый конденсат в импактных стеклах кратера Лонар. ПЭМ.

сравнение с продуктами конденсации, обнаруженными нами ранее в кратере Жаманшин [5] и в лунном реголите [6].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнялись на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-2100, оснащенный энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) “Oxford INCA-450”. Препараты готовились методом суспензий, при котором измельченное механически вещество дополнительно диспергировалось ультразвуком. После этого капля суспензии препарата в аналитически чистой воде наносилась на электронно-микроско-

пическую сеточку-подложку и высушивалась в термостате при 50°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе выполнения поставленной задачи удалось обнаружить агрегаты высокотемпературного конденсата как пленочного высококремниевое (рис. 1, 2), так и глобулярного высококальциевого (рис. 3, 4). На их конденсационную природу указывают как их морфология и состав, так и их размер. На рис. 1 представлено ПЭМ-изображение фрагмента пленочного конденсата, состоящего из агрегата аморфных наноразмерных частиц высококремниевое состава, образовавшихся при гетерогенном конденсатном процессе. В его ЭДС-спектре (рис. 2) в пределах чувствительности метода не фиксируется никаких других элементов, кроме Si и O. Пики меди, присутствующие в данном спектре, флуоресцентно возбуждены от медной сеточки-подложки. На рис. 3 представлены несколько также аморфных, отдельных, но слипшихся высококальциевых глобулярных агрегатов, нарастающих на поверхность частицы расплавленного стекла. Скорее всего, они сформировались при слиянии одиночных центров конденсации. В ЭДС-спектре (рис. 4) этого агрегата частиц, помимо кальция, фиксировались Si, Al, Mg, Fe. Его состав (мас. %): SiO₂ 24.09 ± 0.31; Al₂O₃ 28.92 ± 0.33; MgO 1.27 ± 0.12; CaO 45.02 ± 0.37; FeO 0.7 ± 0.09. В некоторых участках этих высококальциевых глобул зафиксированы начальные стадии раскристаллизации, что подтверждается появлением отдельных дифракционных рефлексов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как было показано в ходе экспериментов, кремнезем испаряется одним из первых наиболее

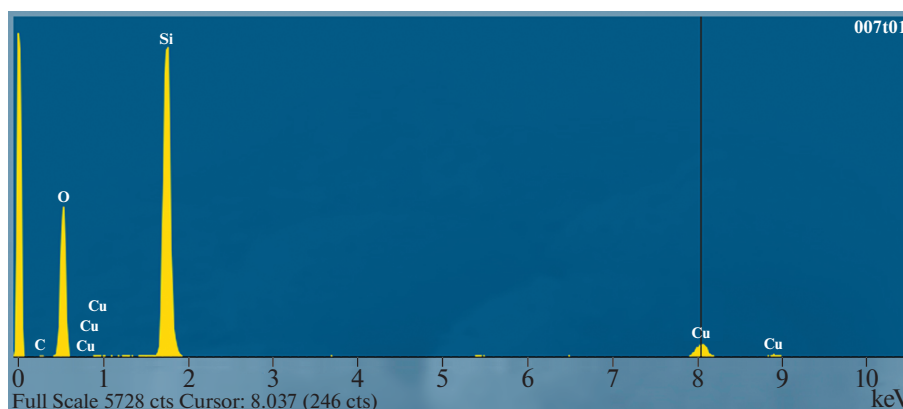


Рис. 2. ЭДС-спектр высококремниевое конденсата в импактных стеклах кратера Лонар. Пики меди от сеточки-подложки. ПЭМ.

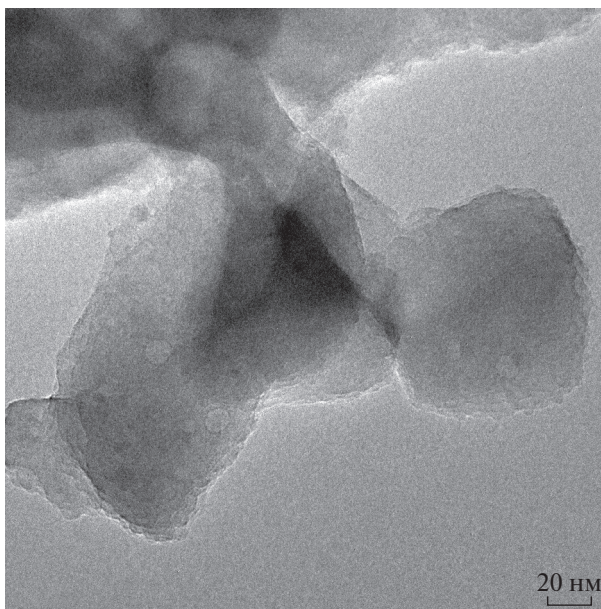


Рис. 3. Высококальциевый конденсат в импактных стеклах кратера Лонар. ПЭМ.

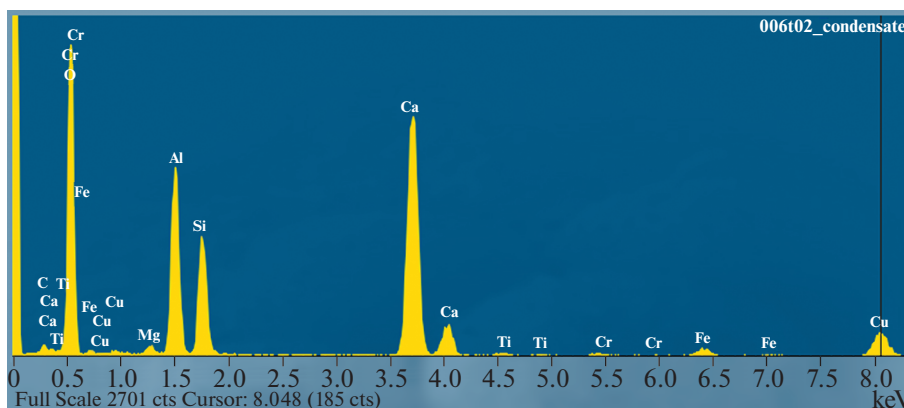


Рис. 4. ЭДС-спектр от высококальциевого конденсата. Пики меди от сеточки-подложки. ПЭМ.

интенсивно по сравнению с другими петрогенными компонентами мишени и составляет ~60% от общего объема газово-плазменного облака [7]. Преобладающее содержание кремнезема в импактнообразованном паре не зависит от состава пород мишени [8]. Так, согласно результатам по импульсному лазерному испарению образцов габбро-анортозитового состава из сборов “Apollo-16” содержание кремнезема в парах составляло ~85 мас. % на фоне его максимальных массопотерь из расплава [9]. Позднее эксперименты по испарению пород кислого состава [10] подтвердили эту тенденцию.

Что касается природных условий, то на Луне, где коренными породами являются анортозиты и

базальты, высококремниевый конденсат был зафиксирован неоднократно [11, 12]. Позднее на Земле высококремниевый конденсат был обнаружен в крупном кратере Жаманшин, где породы мишени были представлены кристаллическими сланцами фундамента, перекрытые осадками карбонатно-песчано-глинистого состава [5]. Следует отметить, что на Земле большинство изученных импактных кратеров расположены на суше и, соответственно, наложены на кислые породы континентальной коры. Кратер Лонар, располагающийся на траппах базальтового состава, является редким исключением, поскольку другие аналогичные импактные структуры, находящиеся в ложе Мирового океана, нам недоступны. Обнару-

женный в рамках настоящего исследования высококремниевый конденсат кратера Лонар подтверждает отсутствие определяющего влияния состава мишени на состав импактных конденсатов.

Вывод об отсутствии определяющего влияния состава мишени на состав импактных конденсатов имеет лишь качественный характер. Количественные соотношения образующихся конденсатных фаз будут зависеть от валового состава испаренных пород. Однако качественный состав компонентов конденсата будет схожим, что подтверждают данные, полученные в настоящем исследовании. Иными словами, исключительно условия высокоэнергетичного процесса образования данных конденсатов оказывают более значительное влияние на их качественный состав, чем валовой состав испаряемых пород мишени.

Можно предположить, что в случае импакта с мишенью из преимущественно карбонатитовых пород высокого содержания кремнезема в конденсате не будет. Однако в масштабах геологических тел, сопоставимых с объемами реальных импактных событий в земных условиях (исключающих микроимпакты), содержания кремния в них вполне достаточны для образования полного ряда конденсатных продуктов. Иными словами, отобрать образец мрамора или известняка объемом в кубический дециметр с содержаниями $\ll 1$ мас. % SiO_2 можно, но найти блок такого же состава объемом в 100 кубометров будет уже гораздо труднее. В кубические километры карбонатных пород, вовлеченных в импактное событие, непременно попадет высококремнистый материал — кремневые конкреции (как макро-, так и микроразмеров), рассеянное глинистое вещество или глинистые отложения, перекрывающие известняки, рассеянные включения кварца и магнезиальных силикатов в мраморах, кальцифиры и скарнированные участки мраморов, прослой и будины кристаллических сланцев в мраморах. Например, импактное событие в Жаманшине затронуло породы до глубин 500–600 м, включая как 200-метровую толщу карбонатно-глинистых осадков, так и метаморфические породы фундамента на сотни метров вглубь. В случае высокоэнергичного импакта с очень высокими давлениями и температурой, плавлению и испарению подвергаются кубические километры очень разных по составу горных пород.

В газовой-плазменной облаке экстремально высокие давления и температура поначалу снижаются очень быстро, но потом в областях с более умеренными параметрами скорость их снижения замедляется. Поэтому конденсационное окно для тугоплавких элементов (Ca, Mg, Al, Ti) будет совсем скоротечным и завершится при температуре порядка 1850°C, в то время как для Si оно будет

оставаться открытым до 1750°C [9], продолжаясь на протяжении первых единиц секунд [13]. Вероятно, этим объясняется крайне редкая встречаемость высокотемпературного высококальциевого конденсата, и обнаружение его в рамках настоящей работы является большой удачей. Отмеченный выше факт раскристаллизации высококальциевого конденсата, очевидно, является начальной стадией его разрушения. В то же время высококремниевый конденсат в силу своего состава плохо подвержен раскристаллизации и оказывается наиболее стойким к разрушению. Для высококальциевого конденсата, в составе которого присутствуют и другие элементы, процесс раскристаллизации выражен гораздо ярче, и обнаружить его в первоначальном виде практически невозможно. Именно молодой возраст кратера Лонар позволил нам обнаружить, помимо высококремниевый, еще не успевший разрушиться высококальциевый конденсат.

Схожий высококальциевый конденсат недавно был зафиксирован нами на Луне [6]. Шарики размером до 0.5 мкм содержали Al–Ca-ядро, покрытое тонким слоем аморфного SiO_2 . Очевидно, что ядро конденсировалось еще в высокотемпературной зоне конденсационного окна и потом покрывалось высококремниевым конденсатом в ходе падения температуры.

Поскольку на Земле на скорость разрушения аморфных импактных конденсатов оказывает влияние состав окружающей среды с присутствием водяных паров, то сохранность этого высококальциевого конденсата за время нахождения в земной атмосфере объясняется консервирующим эффектом высококремниевый покрытия. Однако высококальциевый конденсат, найденный нами в кратере Лонар, не имеет высококремниевый стеклянного покрытия и соответственно не защищен от агрессивного воздействия атмосферы.

В составе обнаруженного нами конденсата кратера Лонар, помимо Ca, зафиксированы еще и Si, Al, Mg и Ti. Согласно экспериментальным данным [14] в высокотемпературной области (2000–2400°C) в парах наряду с труднолетучими оксидами кальция, титана и алюминия постоянно присутствовал SiO. Кроме того, на примере испарения ларнита Ca_2SiO_4 и мервинита $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ Герасимов и соавт. [15] доказали существование в конденсате молекул-кластеров CaSiO_3 . Именно кластеры CaSiO_3 являются, по мнению авторов, наиболее устойчивой молекулярной группировкой при испарении различных силикатов. При этом кластеры могут объединять элементы, значительно отличающиеся по индивидуальной летучести.

Присутствие в составе обнаруженного нами высококальциевого конденсата кратера Лонар

относительно низколетучих элементов, таких как Fe, Mg и Si, можно объяснить наличием этих элементов в газовой-плазменной облаке в виде комплексов или кластеров, температуры конденсации которых точно неизвестны и могут лежать в том же диапазоне.

ВЫВОДЫ

Обнаруженный в кратере Лонар высококремниевый конденсат, аналогичный найденному в кратере Жаманшин и в лунном реголите, подтверждает отсутствие определяющего влияния состава силикатной мишени на состав импактных конденсатов и подтверждает подобие характера протекания мощного импактного процесса в высокотемпературной его области как в земных, так и внеземных условиях.

Наличие в кольцевых структурах высокотемпературных конденсатных стекол может быть одним из диагностических критериев, позволяющих отличать вулканогенные образования от импактных. К типу высокотемпературных конденсатов относятся стекла с высоким содержанием Al, Ca и Ti. Высококремниевые стекла можно приписать как к высокотемпературному, так и среднетемпературному интервалу. Поэтому обнаружение высококальциевых высокотемпературных конденсатных стекол является однозначным свидетельством импактного процесса. К низкотемпературным конденсатам относятся стекла, в составе которых могут превалировать наряду с Si такие элементы, как Na, Mg, K и Fe. Температура образования таких стекол ниже 1500°C. Такой конденсат может возникать не только при импакте, но и при вулканических процессах, включая фумарольные.

Впервые в земном импактном кратере Лонар обнаружен высококальциевый высокотемпературный конденсат. Его находка на практике подтверждает ранее сделанные в литературе теоретические выводы на основании результатов геохимических экспериментов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность О.И. Яковлеву (ГЕОХИ РАН) за плодотворные консультации.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 0136–2019–0010 “Исследования состава и структуры минерального вещества высококальциевыми методами”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Райзер Ю.П.* О конденсации в облаке испаренного вещества, расширяющегося в пустоту // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. № 6. С. 1743–1750.
2. *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.
3. *Jourdan F., Moynier F., Koeberl C., Eroglu S.* ⁴⁰Ar/³⁹Ar Age of the Lonar Crater and Consequence for the Geochronology of Planetary Impacts // Geology. 2011. V. 39. № 7. P. 671–674.
4. *Subrahmanyam B.* Lonar Crater, India: A Crypto-volcanic Origin // Journal of the Geological Society of India. 1985. V. 26. № 5. P. 326–335.
5. *Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатилов О.А.* Конденсатные стекла кратера Жаманшин. I: Иргизиты // Петрология. 2016. Т. 24. № 1. С. 3–24.
6. *Мохов А.В., Горностаева Т.А., Карташов П.М., Рыбчук А.П., Богатилов О.А.* Высокотемпературный Al–Ca-конденсат в лунном реголите // ДАН. 2019. Т. 487. № 2. С. 85–89.
7. *Куликов И.С.* Термическая диссоциация соединений. М.: Изд-во “Металлургия”, 1969. 574 с.
8. *Иванов А.В.* Роль испарения в формировании химического состава лунных стекол // Геохимия. 1975. № 8. С. 1150–1153.
9. *Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П.* Условия образования пленочных конденсатов на поверхности частиц лунного реголита // Геохимия. 2011. № 10. С. 1025–1031.
10. *Horz F., Fechtig H., Janicke J., Schneider E.* Morphology and Chemistry of Projectile Residue in Small Experimental Impact Craters // 14 Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1983. V. 14. P. B353–B363.
11. *Keller L.P., McKay D.S.* Impact Glasses and Vapor Condensates in Apollo 11 Soil // Abstracts for the Lunar and Planetary Science Conference. 1992. V. 23. P. 673–674.
12. *Warren P.H.* Lunar Rock-rain: Diverse Silicate Impact-vapor Condensates in an Apollo-14 Regolith Breccias // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. V. 72. P. 3562–3585.
13. *Зельдович Б., Райзер Ю.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 656 с.
14. *Яковлев О.И., Шорников С.И.* Экспериментальное изучение испарения хондритов и Ca–Al-включений // Вестник ОНЗ РАН. 2011. 3. NZ6104. Т. 10. С. 2205. <https://doi.org/10.2205/2011NZ000234>
15. *Герасимов М.В., Диков Ю.П., Яковлев О.И.* Кластерный тип испарения силикатов: новые экспериментальные данные // Петрология. 2012. Т. 20. № 5. С. 439–449.

HIGH-TEMPERATURE IMPACT CONDENSATE OF THE LONAR CRATER (INDIA)

**T. A. Gornostaeva^{a,#}, A. V. Mokhov^a, A. P. Rybchuk^a,
P. M. Kartashov^a, and Academician of the RAS O. A. Bogatikov^a**

^a *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: avm8okhov@gmail.com*

For the first time, a high-calcian high-temperature condensate was detected in the earth's impact crater Lonar. Its find in practice confirms previously made in the literature theoretical conclusions from the results of experiments. The high-silica condensate found in the Lonar crater is similar to ones found in the Zhamanshin crater and in the lunar regolith, what confirms the lack of correlation between the composition of the target and the impact condensates composition. The presence of high-temperature condensate glasses in circular structures may to be one of the diagnostic criteria for distinguishing volcanogenic formations from impact ones.

Keywords: Lonar crater, Zhamanshin crater, lunar regolith, glass condensate, high temperature condensate, impact glasses, TEM, EDS, nanoparticles