

ИЗУЧЕНИЕ ДОЗИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА МИНЕРАЛЫ

Лазерное излучение обладает большой энергией сконцентрированной в небольшом объеме. Изучение возможностей применения лазерного воздействия на минералы с целью использования в диагностике минералов являлось целью наших исследований.

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИНЕРАЛЫ И ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

Некоторые отрывочные сведения об особенностях воздействия лазерного излучения на минералы содержатся в публикациях по лазерному эмиссионному микро-спектральному анализу, в особенности в обобщающей работе по этому методу [1]. Указывается, что "для сульфидов семейства галенитов характерно образование широкого оплавленного валика..., для пирита — радиальное разбрызгивание вещества, для эритрина — образование валика с небольшими оплавленными шариками вокруг кратера" (с. 106), "на силикатах, боратах и карбонатах часто можно видеть "пробоины" с более или менее оплавленными краями" (с. 138).

Специальное изучение воздействия лазерного излучения на минералы и горные породы велось в последнее десятилетие. Здесь выделяется серия работ Н.К. Шафранова с соавторами. В первой работе [2] использовалось плавление горных пород лучом лазера в одинаковых условиях: CO_2 — лазер 500 Вт мощностью, плотность мощности $2,5 \text{ ккал/см}^2$, длина волны 10,6 мкм, оптимальная длительность облучения 30 с, фокусированный пучок диаметром 5 мм, температура воздействия 3000°C , застывание расплава стекла при комнатной температуре, объем пирогенного стекла $0,5\text{—}2,0 \text{ см}^3$. Было показано, что у полученного пирогенного стекла возможно определение показателя преломления (среднее из 10 определений) и последующее определение содержания SiO_2 в породе по построенному графику зависимости содержания SiO_2 от светопреломления стекла. Тот же мощный лазер непрерывного действия использовался для изучения разрушения минералов и зависимости этого разрушения от свойств минералов [3]. На разных минералах получены кратеры глубиной от 0,1 до 5 см. Строение кратеров также было разным. Так, в силикатах получались кратеры с формой усеченного конуса, заполненные на 40—100% стеклом. На сульфидах и окислах получались кратеры с внешним валиком. В слюдах и солях получались овальные и цилиндрические полые отверстия.

При кратковременном воздействии мощного лазерного луча на серно-колчеданные руды (пирит 80—90%, кварц 10—20%) образуются зональные пирогенные зоны от 0,1 до 2,5 мм. Внешняя зона состоит из тонкозернистого пирротина гексагональной и моноклинной модификации, средняя состоит из лучистого пирротина с оплавленными зернами кварца, внутренняя зона — из кислого стекла с включениями пирротина [4]. Таким образом при воздействии лазерного луча происходит новообразование минералов в кратерной зоне. Это исследование было продолжено и уточнено в другой работе [5]. Установлена зависимость между структурой и прочностью новообразованного пирогенного вещества, образующегося при воздействии лазерного луча на серноколчеданные руды и другие горные породы. Специально изучалось воздействие лазерного луча на осадочные горные породы [6]. Здесь также была получена зависимость степени разрушения пород лучом лазера от физико-механических свойств и минералогического состава породы.

Импульсный лазер LMA-10 использовался для моделирования ударных процессов на ранней стадии развития планетных систем [7]. Проводятся параллели между лазерными кратерами и метеоритными кратерами на Луне. В частности, обращается внимание на такие особенности лазерных кратеров, как конусы сотрясения, тонкие трещинки спайности, остеклованные частицы и расплавные валы. Обсуждаются сходные особенности фракционирования элементов по степени летучести при метеоритных и лазерных ударах.

Две работы посвящены изучению минерала прустита Ag_3AsS_3 в связи с тем, что этот минерал способен медленно изменяться под действием обычного светового облучения. В первой работе [8] использовалась акустотермическая фокусировка лазерного луча (термический эффект, возникающий при дифракции света на ультразвуке). Изучалось разрушение прустита и стекол состава As_2S_3 и $HgAs_4S_7$. В другой работе [9] детально изучено разрушение полированной поверхности синтетического прустита с помощью лазера типа ЛТИПЧ-8 с фокусировкой и без фокусировки луча. Изучено влияние на разрушаемость числа импульсов, их мощности, формы пучка накачки, морфологии образцов, их ориентировки и поверхностной обработки. Обнаружены низкий порог термического разрушения и эффект накопления разрушений в прустите. Влияние ориентировки кристаллов и степени полировки на степени разрушения сказывается слабо, что объясняется наличием стеклообразного поверхностного слоя, образующегося при полировке прустита.

В кварце обнаружено двойникование под воздействием лазерного излучения [10]. Лазер на основе $Y-Af$ граната использовался для шлифовки алмазов, содержащих вставки на поверхности граней [11]. Наконец при изучении минералов использовался открытый советскими учеными светогидравлический эффект, получающийся при фокусировке лазерного луча на погруженные в жидкость предметы [12]. При этом возникают температуры до $1000000^\circ C$ и давления до 1000000 атм.

Помимо минералов, физиками изучено большое количество веществ и материалов при воздействии лазерного луча, но рассматривать эти работы мы не имеем возможности.

В отношении исследования минералов можно сказать, что воздействие лазера в большинстве исследований не было строго дозированным, следовательно, сопоставление полученных данных затруднительно.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ДОЗИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА МИНЕРАЛЫ

В наших исследованиях применялся портативный лазерный микроотборник, изготовленный в ГОИ и переданный на временные испытания в ИМГРЭ. Техническая характеристика прибора приводится по данным разработчиков [13]: "Лазерная головка закреплена на штативе микроскопа "Полам". Конструкция серийного микроскопа осталась без изменений. В основании пробоотборника находится система питания лазерной головки с пультоуправления режимами лазера. Активный элемент лазерного излучателя — неодимовое стекло, длина 90 мм, диаметр 5 мм, длина волны излучения 1,06 мкм. Лазер работает в режиме свободной генерации; энергия на выходе в импульсе излучения регулируется: 0,2, 0,15 и 0,1 Дж, энергия накачки не более 30 Дж, длительность импульса 70 мкс, расходимость лазерного пучка 5', диаметр лазерного пучка на выходе 5 мм, потребляемая мощность 30 Вт.

Система наблюдения через микроскоп и система проектирования лазерного пучка разделены. Излучение лазера сфокусировано в плоскость предмета микроскопа линзой с фокусным расстоянием 30 мм. При настройке прибора изображение участка, на который сфокусирован лазерный пучок, совмещено с центром перекрестия окулярной сетки. Площадь сфокусированного лазерного

излучения в плоскости предмета микроскопа составляет $0,8 \cdot 10^{-4}$ см². В приборе предусмотрена возможность регулировки площади пятна облучения... Система охлаждения активного элемента отсутствует. Источник питания лазера построен на унифицированных платах. Габаритные размеры прибора $430 \times 380 \times 175$ мм, вес 8 кг (из них 5 кг приходится на микроскоп)."

Прибор предназначен для отбора на специальные электроды микропроб, напыляемых на торец электрода при выбросе материала из кратера, образуемого в месте фокусировки лазерного пучка на поверхности образца (минерала).

Нами исследованы размеры кратеров, образуемых на поверхности минералов, для выяснения возможности применения микроотборника в микро-минералогических исследованиях. При этом обнаружилось, что лазерный разряд одинаковой мощности дает на поверхности одного и того же минерала при одинаковой ориентировке равные по размерам и морфологии кратеры. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на выяснение зависимости параметров кратеров от природы вещества при воздействии на него стандартным по мощности лазерным ударом. Было изучено большое количество минералов разных химических классов, в основном непрозрачных или полупрозрачных, так как через совершенно прозрачные минералы лазерный луч проходит без образования кратера.

Исследования велись, главным образом, на полированных шлифах, реже на естественных и спайных поверхностях.

Для стандартности условий измерения лазерный луч был сфокусирован на участке образца, проектирующегося на перекрестие нитей окуляра при сфокусированном положении системы микроскопа на поверхность исследуемого образца. Использовался все время один и тот же режим наименьшей энергии свободной генерации, чтобы кратеры имели наименьший размер. Параметры кратеров измерялись и изучались под микроскопом и на фотографиях их микроскопических изображений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ МИКРОЛАЗЕРНЫХ КРАТЕРОВ

При микроскопическом изучении микролазерных кратеров было выявлено большое разнообразие в их строении и размерах. В строении микролазерных кратеров выявляются следующие важнейшие элементы: 1) собственно кратер — углубление в месте удара луча (изредка углубление отсутствует или вместо него обнаруживается возвышение за счет вспучивания материала минерала в месте удара лазерного луча); 2) валик по краю кратера из выброшенного или выплавленного материала (иногда валика нет); 3) ореол теплового и химического воздействия вокруг кратера (иногда ореола нет); 4) выбросы капель и частиц, оставляющих на поверхности минерала характерные следы. Кроме того, при лазерном ударе могут выделяться новообразованные фазы, дым, запах, звук (щелчок), образовываться пламя. В табл. 1 собраны качественные характеристики строения микролазерных кратеров. При этом фиксировались не только относительные размеры элементов строения кратеров, но и их форма и другие особенности (рис. 1—4).

Поскольку исследовалось значительное количество рудных минералов и некоторые важнейшие породообразующие, интересно обобщить полученные первые результаты.

Зависимость размеров кратера от природы минерала носит сложный характер. Большинство легкоплавких металлов и металлоидов (висмут, олово, свинец, сера, сурьма, теллур) имеют наибольший размер кратера среди простых химических веществ. У индия и селена поперечник кратера не очень большой, но характерна его большая глубина. Германий и титан, не столь уж тугоплавкие вещества, так же обладают большим поперечником кратера. Наименьший размер кратера наблюдается или у очень тугоплавких элементов или у металлов с сильным светотражением

Таблица 1

Качественные характеристики микролазерных кратеров в минералах

Минерал, вещество	Кратер	Ореол	Валик	Другое
1	2	3	4	5
Самородные элементы				
Ванадий	Небольшой	Большой	Нет	
Висмут	Большой, зазубренный	За счет выброса	Слабый	Сильный выброс
Вольфрам	Маленький неровный	Нет	Нет	
Германий	Большой, овальный	Нет	Слабый	Большой выброс
Графит	Средний, неровная поверхность	Нет или очень слабый	Нет	Сильное пламя, откалывание слоев
Железо	Средний, неровный	Нет	"	Слабый разлет капель
Индий	Зональный, глубокий в центре	Средний	"	
Кобальт	Средний, неровные края	Нет	"	Выплавление без выброса
Магний	Небольшой, овальный	Большой	"	Сильный разброс частиц
Медь	Маленький, неровный, круглый	Зональный, внутри светлый, снаружи бурый	"	
Молибден	Маленький, неровный	Нет	Средний	
Никель	Средний, неровный	Нет		Сильный разлет капель
Олово	Большой	"	Нет	
Платина	Средний, неровный	"	"	Расплавление без выброса
Свинец	Большой, глубокий, зональный	Бурый со светлыми лучами	Два внутренних валика	Разлет частиц
Селен	Глубокий, овальный	Нет	Тонкий	Без выброса; желтый дым
Сера аморфная	Большой	"	Нет	Рваные края
Серебро	Маленький, круглый	Слабо окрашенный ореол	"	Сильное разбрызгивание частиц
Сурьма	Большой, асимметричный	Слабый	"	Мощный разлет частиц назад
Теллур	Огромный	"	Средний	Мощный выброс и расплавление
Титан	Большой, неровный	Нет	"	Мощное разбрызгивание капель
Цинк	Средний, овальный	Почти нет	Нет	Дальний разлет частиц
Хром	Средний, неровный	Узкий, побурение	"	Разлет частиц
Простые и сложные сульфиды				
Антимонит	Средний, овальный	Большой	Нет	Сильный звук
Аргентит	Большой, неровный	Средний, цветной	Отдельные капли	
Аурипигмент	Вспучивание с покраснением	Нет	Нет	Белый дым, чесночный запах
Борнит	Средний, неровный	Небольшой	Отдельные выступы	Хорошее плавление в кратере
Висмутин	Огромный	Большой	Большой	Разбрызгивание частиц
Галенит	Средний	Большой	Небольшой	Хорошее плавление внутри кратера
Киноварь	Глубокий, большой	Средний, светлый	Нет	Разлета частиц нет
Ковеллин	Большой, глубокий	Нет	"	
Козалит	Небольшой	Средний	"	Разбрызгивание назад
Марказит	Средний	Радужный	"	
Молибденит	Средний, овальный	Большой, радужный	"	

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
Простые и сложные сульфиды				
Пирит	Средний, овальный	Радужный, средний	"	
Пирротин	Средний, овальный	Средний	Вспучивание на краях кратера	
Реальгар	Средний, неровный	Нет	Нет	Выкрашивание
Станнин	Средний, неровный	Средний	"	Плавление в кратере
Сфалерит	Средний, овальный или неровный	Большой, светлый	Небольшой или нет	
Халькопирит	Средний	Радужный, большой, средний	Нет	
Арсениды, антимониды и сульфосоли				
Арсенопирит	Средний, неровный	Большой	Нет	Сильный звук, разлет частиц
Буланжерит	Большой, края неровные	Большой	"	Оскольчатое отслаивание
Джемсонит	Средний	Небольшой	Червеобразные выступы	Разброс частиц
Кобальтин	Крупный, квадратный	Средний	Нет	
Никелин	Средний	Большой цветной	"	Разлет капель большой
Прустит	Средний, неровный	Средний	"	Разбрызгивание назад
Раммельсбергит	Средний	Большой	Узкий	
Шмальтин	Средний	Большой	Узкий	
Простые и сложные окислы				
Гематит	Маленький	Средний	Нет	
Ильменит	Небольшой, глубокий	Небольшой	"	Плавление в кратере
Касситерит	Средний или маленький, неровный	Узкий, цветной	"	
Кварц	Нет или выкрашивание	Осветление	"	Растрескивание, сколы
Колумбит	Небольшой, овальный	Небольшой	"	
Куприт	Глубокий, средний	Средний	"	Слабый разлет
Морьон	Маленький	Нет	"	
Магнетит	Средний, овальный	Небольшой	"	Метельчатый выброс
Перовскит	Средний	Небольшой	"	
Рутил	Маленький, овальный	Узкий, зональный	"	Расплавление в кратере
Танталит	Средний	Узкий, яркий	"	
Титаномагнетит	Небольшой	Узкий	"	Плавление в кратере
Хромит	Небольшой, неровный	Узкий	"	Форма кратера по спайности
Гидроокислы				
Гетит	Средний, овальный	Нет	Нет	
Лимонит	Маленький, глубокий	"	"	
Пирролюзит	Глубокий, неровный	"	"	
Псилометан	Черный, овальный, глубокий	"	Червячки по краям	Рост червячков из кратера
Тодорокит	Черный, овальный, глубокий	Узкий	Червячки по краям	Рост червячков у кратера
Метамиктные окислы и силикаты				
Браннерит	Овальный, средний	Слабый	Нет	
Ловчоррит	Округлый с выкрашиванием	Средний	"	Пузырчатая масса в кратере
Ортит	Округлый, средний	Узкий, сизобурий	"	Разлет частиц
Лопарит	Небольшой	Нет	"	
Пирохлор	Овальный, средний	Средний	"	

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5
Самарскит	Большой, овальный	Небольшой	"	Разбрызгивание частиц
Струверит	Средний, овальный	Узкий	Нет	Слабый разброс частиц
Фергюсонит	Неровные края	Нет	"	Растрескивание
Ферсмит	Неровные края	Узкий, бурый	"	Слабый разброс
Циркелит	Овальный, средний	Нет	"	Слабый разброс частиц
Эшинит	Неровные края	Очень слабый	"	
Силикаты				
Авгит	Средний	Средний	Тонкий	
Анрадит	Маленький, округлый	Узкий	Нет	
Астрофиллит	Квадратный	Узкий сизый, бурый пошуре	"	Разбрызгивание частиц
Биотит	Круглый, гладкий	Нет	"	
Даналит	Неровные края	Небольшой	"	Разбрызгивание частиц
Дифсид	Овальный, средний	Небольшой	"	Сколы по спайности
Ильваит	Овальный, средний	Небольшой	Тонкий	Разброс частиц
Полевой шпат	Рваные края	Нет	Нет	Выкрашивание по спайности
Рамзаит	Овальный, средний	Узкий, сизобурый	"	
Сподумен	Маленький, округлый	Слабый	Нет	Выколки по спайности
Ставролит	Овальный, средний	Большой, анизотропный		
Сфен бурый	Овальный, средний	Маленький	Слабый	Расплав внутри кратера
Циркон	Небольшой, округлый	Небольшой, сизобурый	Нет	Выкрашивание по трещине
Шерл	Круглый, мелкий	Узкий	"	Сколы: разброс частиц
Энигматит	Средний, округлый	Двойной	"	
Вольфраматы, бораты, галогениды				
Вольфрамит	Большой, круглый	Цветной, средний	"	
Гюбнерит	Средний, круглый	Цветной, средний	"	Выброс материала
Людвигит	Пологий	Небольшой	"	
Ферберит	Большой, круглый	Цветной, средний	"	Выброс материала
Флюорит фиолетовый	Неровные края	Нет	"	

(ванадий, вольфрам, магний, медь, молибден, серебро). Среди сульфидов наибольший размер кратера наблюдается у соединений с легкоплавкими элементами Вi, Hg (висмутин, киноварь) или у соединений с благородными металлами и их аналогами (Au, Ag, Cu) (аргентит, ковеллин). Но козалиит не укладывается в эту схему, имея маленький кратер. Остальные сульфиды имеют средний размер кратера, так же как арсениды, антимониды и сульфосоли. У последних большой кратер имеют буланжерит и кобальтин. Для простых и сложных окислов больших кратеров не наблюдалось; маленьким кратером обладали рутил, кварц, гематит, ильменит, колумбит, титаномагнетит и хромит. Гидроокислы больших в поперечнике кратеров также не имеют, но большинство их глубокие. У метамиктных минералов только самарскит имел большие кратеры, а лопарит — наименьшие. Все силикаты имели маленький или средний кратер. У остальных минералов большой кратер имели ферберит и вольфрамит. Гюбнерит уже имел средний размер кратера.

Разнообразна форма кратеров, в основном не зависящая от размеров кратера. Округлую или овальную форму в плане имеют многие кратеры среднего размера. Но и среди них, так же как и в других по размерам кратерах, наблюдаются асимметричные кратеры и кратеры с зазубренными, неровными краями. Внутренняя

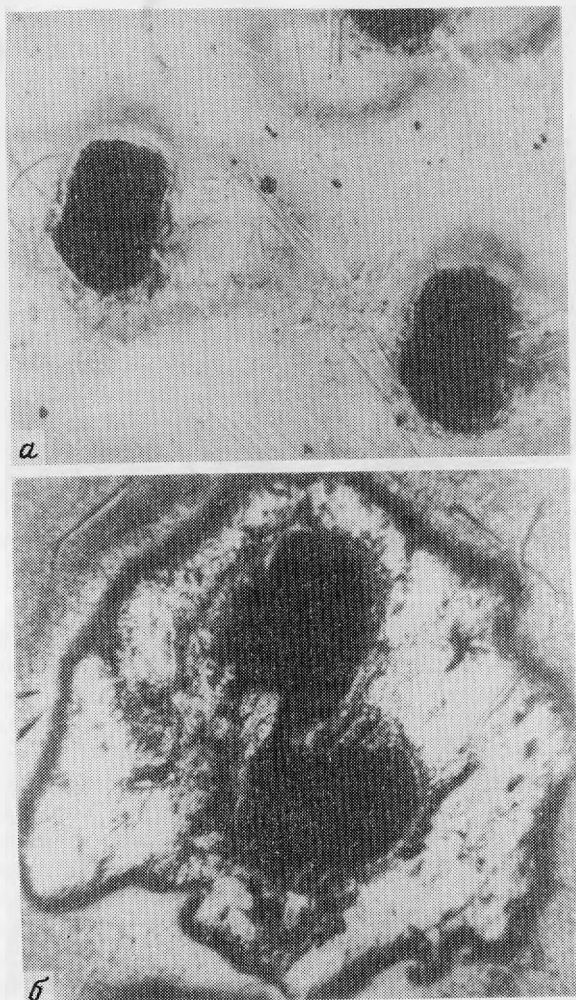


Рис. 1. Сходство в особенностях лазерных кратеров на минералах одного вида, увел. 50
 а — на пирите (одинаковая форма углубления и ореола), б — на графите (неглубокие кратеры)

поверхность кратера может быть неровной, со следами раздувания расплава или ровной и гладкой, как бы высверленной, черной матовой и шероховатой. Последняя поверхность характерна для гидроокислов. У полупрозрачных минералов (многих окислов и силикатов) наблюдались кратеры с неровными, зазубренными краями, особенно у минералов, трещиноватых и обладающих спайностью. У таких минералов как биотит, аурипигмент кратеров не образовывалось, а на месте удара лазерного луча происходило вспучивание массы минерала. У биотита вспучивание вызывало образование плоских холмов, а у аурипигмента вспучивание имело неровную пластинчатую массу. У ловчоррита кратер был в значительной степени заполнен пузырчатым стеклом.

Ореолы вокруг кратеров иногда занимают большую площадь поверхности, чем сам кратер. Такие большие ореолы наблюдались у некоторых металлов (ванадий, магний, медь, свинец, серебро) и халькогенидов (антимонит, висмутин, галенит, молибденит, сфалерит, халькопирит, арсенопирит, буланжерит, никелин, раммельсбергит, шмальтин). Ореолы имели чаще всего серо-бурые, нередко зональные цвета, иногда радужные цвета интерференционной природы до 1 и 2-го порядка. При

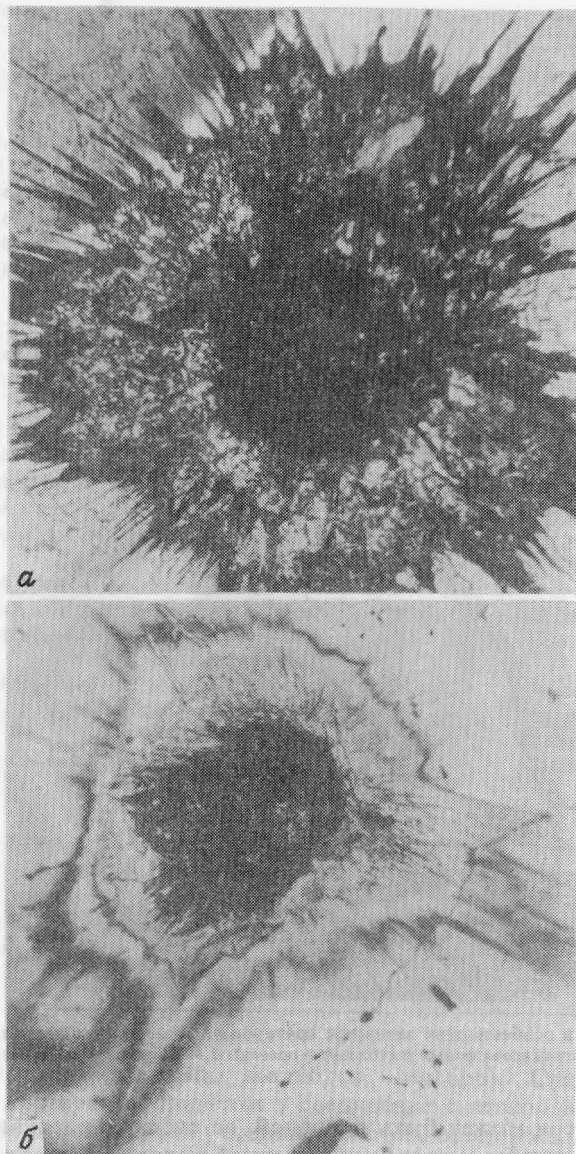


Рис. 2. Крупные лазерные кратеры с большими ореолами, увел. 50

a — на теллуре (глубокий кратер с мощным выбросом вещества), *б* — на никелине (широкий зональный ореол)

этом не всегда ясно, имеет ли эта окраска тепловое происхождение (образование пленки окислов за счет окисления металлов и халькогенидов при сильном тепловом разогреве). Этому должна соответствовать высокая теплопроводность минерала. Нет сомнения, что у некоторых минералов, в особенности содержащих мышьяк (каких много с большими ореолами у кратеров), ореол в значительной степени определяется напылением возогнанного и возможно измененного по фазовому составу минерала, выброшенного из кратера.

У некоторых минералов по краю кратера наблюдался отчетливый *валик* за счет выброса или выдувания материала из кратера. Из металлов он наблюдался у висмута, германия, свинца, селена, теллура, титана; из халькогенидов — у висмута,

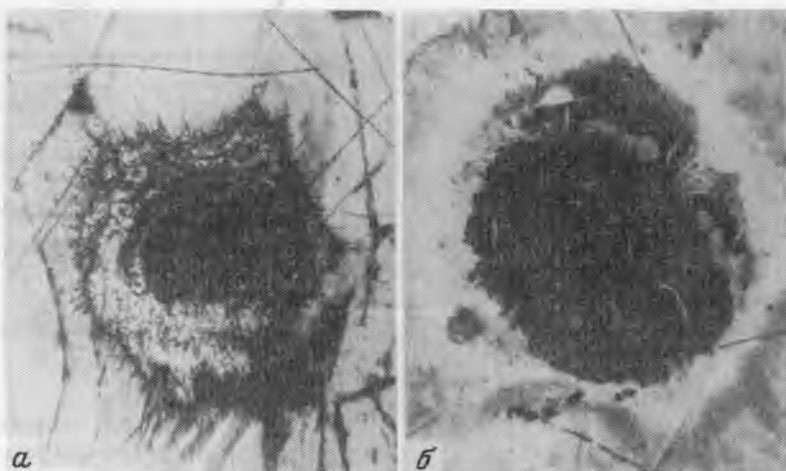


Рис. 3. Лазерные кратеры на распространенных сульфидах с резким различием их особенностей. Увел. 50

а — на галените (высокий валик расплавленного вещества), *б* — на халькопирите (гладкая поверхность кратера без валика)

галенита, сфалерита, раммельсбергита, шмальтина. Тонкий или слабый валик наблюдался у полупрозрачных силикатов (авгита, ильванита, сфена). У остальных минералов валик не наблюдался или наблюдались отдельные выбросы и капли. Некоторые капли и частицы выбрасывались за пределы кратера по прямым траекториям (*выбросы*). Поэтому из кратера в некоторых случаях тянутся сплошные или прерывистые (в виде черточек) лучи, вдоль которых из кратера выбрасывались частицы или целые капли. В конце таких прямых линий темного цвета иногда эти частицы неправильной формы остаются. В конце более толстых линий-лучей наблюдаются капли расплава. Так, разбрызгивание отчетливых капель вокруг кратеров наблюдалось у металлов (ванадий, железо, никель, титан). У многих других элементов наблюдался выброс только частиц. Из халькогенидов только у прустита наблюдался выброс капель. У многих металлов и халькогенидов наблюдался выброс частиц. У некоторых окислов и силикатов, особенно метамиктных, наблюдался выброс частиц.

Необходимо отметить еще такие индивидуальные особенности как сильное пламя и откалывание слоев при воздействии лазерного луча на графит. При воздействии на селен наблюдался отчетливый желтый дым, а при воздействии на аурипигмент — обильный белый дым и чесночный запах. Сильный звук (щелчок) наблюдался при воздействии лазерным лучом на антимонит и арсеницит — минералы сурьмы и мышьяка.

При наблюдении кратеров псиломелана и тодорокита сразу после воздействия лазерным лучом было обнаружено явление довольно быстрого (в течение 1—2 первых минут) разрастание у краев кратера червеобразных, зубцевидно расположенных выступов, возможно кристаллизация высокотемпературных игольчатых кристаллов двуокиси MnO_2 . У минералов с хорошей спайностью наблюдалось откалывание слоев по спайности вплоть до образования кратеров с ограничениями по спайности или вообще по трещинам (буланжерит, хромит, диопсид, полевои шпат, сподумен). Так, у сподумена наблюдались кратеры прямоугольной формы. Заполнение кратеров расплавом наблюдалось у тугоплавких минералов и веществ (кобальт, платина, борнит, галенит, станнин, ильменит, титаномагнетит, сфен). При воздействии на прозрачные и полупрозрачные минералы около кратера менялось двупреломление. Так, в изотропном сечении кварца около кратера наблюдалось

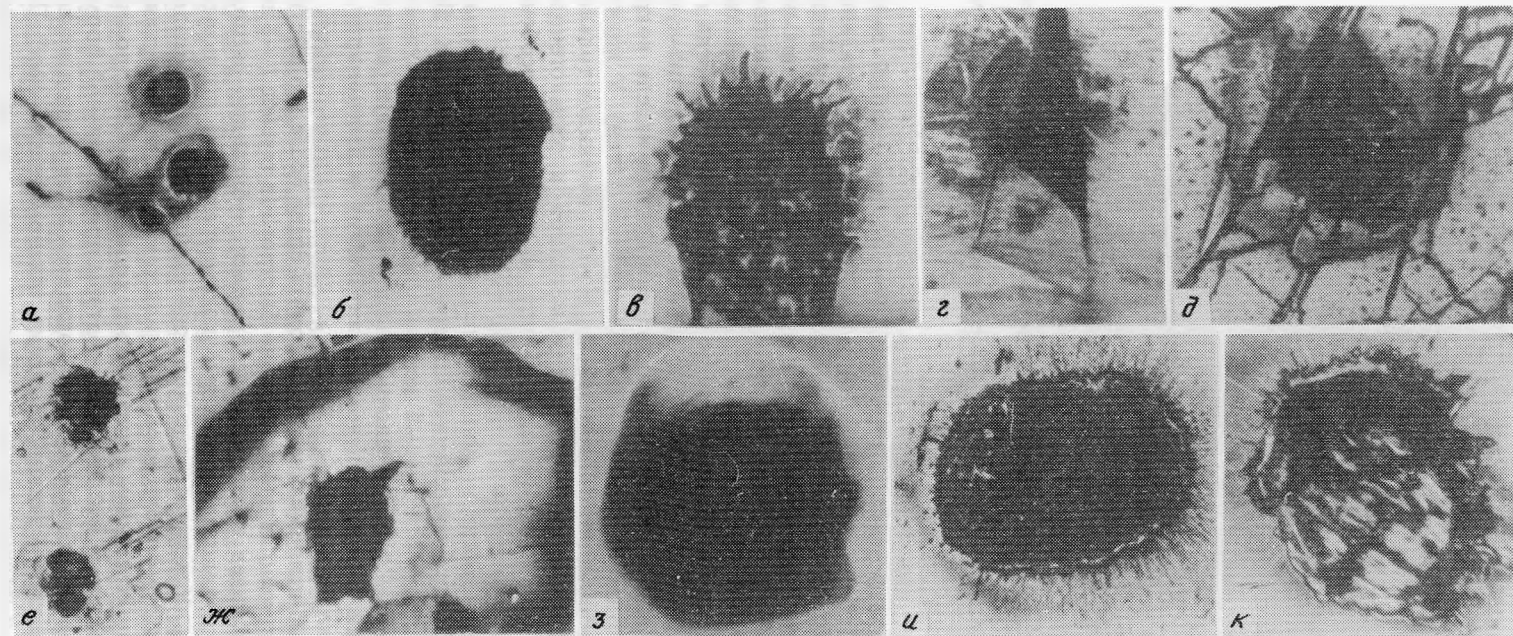


Рис. 4. Особенности лазерных кратеров на разных минералах. Увел. 50

а — на андрадите (круглые маленькие кратеры), *б* — на тодороките (без срезола, с новообразованиями), *в* — на железе (капли расплава в краях кратера), *г* — на диопсиде (скол слоя по спайности около кратера), *д* — на хромите (скол слоев по трещинам), *е* — на меди (маленькие кратеры), *ж* — на касситерите (зазубренные края кратера), *з* — на биотите (вспучивание поверхности параллельно спайности), *и* — на ильваите (неглубокий кратер с разлетом мелких частиц), *к* — на ильмените (неровная поверхность кратера)

Таблица 2

Классификация элементов строения микролазерных кратеров

Свойство	Градации	Примеры минералов
Величина кратера	Большой	Теллур, висмут
	Маленький	Медь, серебро
Форма кратера	Округлая, овальная	Андрадит, циркон
	Неровная, зазубренная	Самарскит, касситерит
Поверхность кратера	Неровная поверхность расплава	Ильменит
	Гладкая поверхность расплава	Магнетит, халькопирит
	Шероховатая поверхность	Ковеллин
Кратерные образования	Плавление	Галенит, железо
	Вспучивание	Аурипигмент, биотит
	Пузырчатое стекло	Ловчоррит
Величина ореола	Большой	Никелин, антимонит
	Маленький или нет	Тодорокит
Валик вокруг кратера	Большой	Висмут, галенит
	Маленький или нет	Гематит, тодорокит
Выброс	Капель расплава	Никель, железо
	Частиц	Сурьма, ильваит
Запах	Чесночный	Аурипигмент
Дым	Белый	Аурипигмент
	Желтый	Селен
Пламя	Сильное	Графит
Звук	Сильный	Антимонит
Откалывание слоев	По спайности	Сподумен, диопсид
	По трещинам	Хромит
Новообразования	В краях кратера	Тодорокит, халькопирит

просветление в скрещенных николях, пропадающее на расстоянии ширины кратера вдали от последнего.

В табл. 2 дается классификация характеристик микролазерных кратеров в минералах с указанием наиболее ярких примеров.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Получение лазерных кратеров на самых разнообразных непрозрачных и полупрозрачных минералах показало большое богатство форм кратеров и преобразования околократерного пространства. Взаимодействие лазерного луча с минералом носит во многом объемный характер, сопровождающийся такими явлениями как взрыв, плавление, испарение, горение вещества. Поэтому у большинства минералов форма и размер кратера мало зависят от ориентировки кристаллической структуры по отношению к направлению лазерного луча. Зато у некоторых минералов независимо от направления падения лазерного луча форма кратера была обусловлена направлениями трещин спайности или отдельности.

Взрыв является главной причиной, определяющей размеры и форму кратера. Для того чтобы произошел взрыв, вещество минерала должно поглотить значительную часть энергии, доставляемой лазерным лучом, в небольшом объеме. Прозрачные минералы пропускают лазерный луч на большую глубину без концентрации энергии в микрообъеме, и кратеры на таких минералах почти не образуются. Если такой минерал имеет дефекты (трещины, газовой-жидкие включения), то включения поглощают свет и кратер образуется (например, в полевом шпате). На прозрачных минералах, но сильно окрашенных и хорошо поглощающих свет, кратеры образуются, но обычно они имеют небольшие размеры и круглую форму (шерл, андрадит).

Таблица 3

Размеры микролазерных кратеров и тепловые свойства простых веществ (элементы)*

Элемент	Размеры кратера, усл. ед.			Удельная теплоемкость, кал/г°С	температура плавления, °С	Удельная теплопровод- ность, кал/см·сек °С	Теплота плавления, кал/г
	диаметр максим.	диаметр миним.	Площадь условного эллипса				
Алюминий	20	15	235,5	0,2096	660,2	0,502	93,96
Ванадий	17	13	173,5	0,120	1700		
Висмут	40	30	942,0	0,028	271	0,0244	12,4—14,1
Вольфрам	1	1		0,0323	3377		61
Германий	28	20	439,6	0,072	958		
Графит	23	19	343,0	0,15		0,0117	
Железо	27	21	445,1	0,1	1535	0,2	
Индий	32	25	628,0	0,055	156,4		6,8
Магний	32	20	502,4	0,2386	651	0,376	55,5—72
Медь	9	6	42,4	0,0909	1083	0,98	51
Молибден	20	16	251,2	0,06	2622	0,35	41,6—52,1
Никель	20	14	219,8	0,1062	1455	0,1428	73
Олово	35	30	824,2	0,54	231,9	0,159	13,96
Платина	23	17	306,9	0,031	1773,5	0,167	23,7
Свинец	35	28	769,3	0,0300	327,4	0,085	5,45
Сера	18	12	169,5	0,172	115		
Серебро	13	12	122,5	0,056	960,5	0,999	19,7—26,01
Сурьма	32	26	653,12	0,05	630	0,045	24,3—40,75
Теллур	35	32	879,2	0,048	449,8	0,01433	7,4
Титан	27	24	546,4	0,1125	1800	0,036	
Цинк	22	14	241,8	0,09176	419,5	0,269	23,01—28,1
Хром	16	13	163,3	0,1039	1800	0,07	69,5

*Тепловые свойства элементов по М.П. Славинскому [14].

У непрозрачных минералов почти вся энергия луча лазера поглощается, и величина кратера сложным образом зависит от теплофизических свойств минералов. Теплофизические свойства хорошо изучены для простых веществ (элементов). В табл. 3 сопоставлены размеры кратеров и теплофизические свойства простых веществ. Каждое теплофизическое свойство в отдельности плохо коррелирует с величиной кратера (рассчитанная площадь условного эллипса). Наилучшая зависимость наблюдается между величиной кратера и теплотой плавления. Чем больше тепла требуется для расплавления единицы веса вещества, тем меньше величина кратера (рис. 5).

Поправки в эту зависимость вносят и другие теплофизические свойства. Так, очень тугоплавкие вещества, например, вольфрам, в сочетании с большой теплотой плавления имеют очень маленький кратер. Маленький кратер у меди и серебра можно объяснить сочетанием большой теплоты плавления с очень большой теплопроводностью — энергия не концентрируется, а быстро рассеивается. Теплоемкость влияет приблизительно так же, как и теплота плавления, но в целом корреляция с размерами кратера хуже.

Теплопроводность, по-видимому, определяет ширину теплового ореола, например, у магния он очень широкий, у меди и серебра настолько широкий и слабый, что незаметен (распространение тепла по всей массе зерна).

По-видимому, на интенсивность взрыва и, следовательно, на величину кратера и ореола разлета частиц влияет химический состав минерала, особенно присутствие атомов летучих элементов (As, Sb, Te), пары которых способны создать высокое давление в области кратера, что приводит к интенсивному взрыву. Перегрев жидкости в газовой-жидких включениях и трещинах замутненных минералов

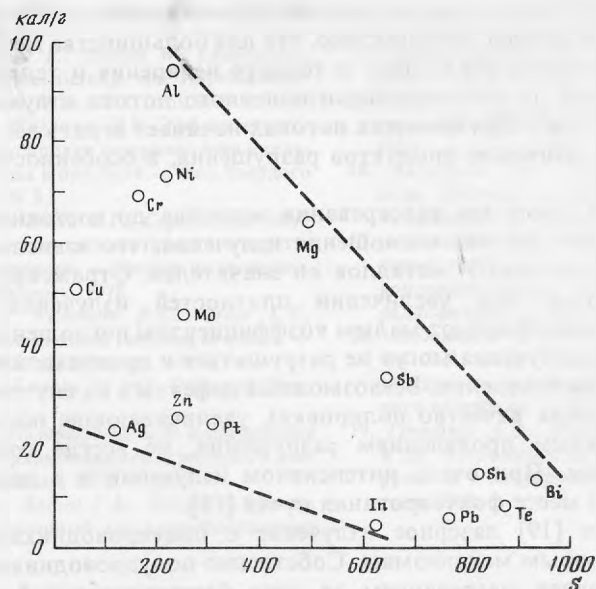


Рис. 5. Зависимость между теплотой плавления (кал/г) и размером S (площадь условного эллипса) лазерных кратеров у простых веществ

(полевой шпат) и минералов, содержащих в составе воду и гидроксил (биотит), приводит или к взрыву с расщеплением, или к вспучиванию.

Быстрое сгорание в воздухе при высокой температуре (магний, графит) сказывается на величине кратера.

Метамиктные аморфные минералы и землистые гидроокислы также обладают специфическими особенностями строения микролазерных кратеров.

Запах, звук и пламя во время удара лазерного луча отличают только немногие минералы, содержащие сильно летучие или легко сгорающие компоненты.

Таким образом, особенности строения микролазерных кратеров определяются природой минералов. При большом разнообразии этих особенностей микролазерные кратеры могут быть использованы в диагностике минералов как дополнительный диагностический признак.

Действие лазерного излучения различной мощности на твердые тела разной природы подробно изучалось физиками. Краткий обзор полученных результатов, имеющий значение для геологических объектов, дан в работе [15]. Здесь подчеркивается, что лазерное излучение воздействует на вещество в зависимости от типа химической связи в нем: металлы, диэлектрики, полупроводники. Экспериментальные исследования показали, что для каждого класса и вида веществ имеется своя критическая плотность потока излучения при заданных форме и длительности импульса, по достижении которой начинается плавление, а затем и испарение вещества. Весьма незначительное время задержки, необходимое для разогревания вещества в месте воздействия, зависит от его теплофизических свойств (теплоемкости, теплопроводности и т.п.). От этого в основном зависит и форма кратеров, получаемых при импульсном воздействии.

Взаимодействие лазерного излучения умеренной плотности с металлами согласно работе [16] зависит от их теплофизических свойств и, в особенности, от теплопроводности. В месте воздействия происходит плавление и испарение металла. Соотношение плотности потока и теплопроводности позволяет описать большинство характеристик процесса разрушения. Интересно, что значительную долю продуктов разрушения составляют брызги жидкого металла, выбрасываемые

потоком пара, и в довольно широком интервале световых потоков форма кратера не меняется, а только ее размер. Установлено, что для большинства металлов значение удельной энергии разрушения близко к теплоте испарения и тепловой механизм разрушения действует до плотностей поглощенного потока излучения приблизительно 10^9 — 10^{10} вт/см². При больших потоках начинает играть все большую роль гидродинамическое движение продуктов разрушения, в особенности, газодинамические явления [17].

Энергия, необходимая для разогревания вещества до состояния плавления и испарения, подводится за счет поглощения излучения, что зависит от коэффициента поглощения вещества. У металлов он значителен. Отражение света полированной поверхностью при увеличении плотностей излучения уменьшается. Диэлектрики, которые обладают малым коэффициентом поглощения, при малых и умеренных потоках излучения могут не разрушаться и пропускать свет, не нагревшись до температуры плавления. Всевозможные дефекты в их внутреннем строении и на поверхности (даже качество полировки), увеличивающие поглощение света, приводят к различным проявлениям разрушения, не всегда сопровождаемым кратерообразованием. При очень интенсивном излучении и в диэлектриках образуются кратеры в месте фокусирования пучка [18].

Согласно работе [19] лазерное излучение с полупроводниками взаимодействует по двум основным механизмам. Собственно полупроводниковый механизм разрушения обусловлен нагреванием за счет безизлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар, генерированных потоком лазерного излучения. Так называемый индуцированный металлический механизм разрушения получается при нагревании за счет поглощения света на неравновесных свободных носителях тока. Эти механизмы существенно зависят от ширины запрещенной зоны диэлектрика. Легирование проводника примесями увеличивает концентрацию свободных носителей и коэффициент поглощения. При сильном легировании получается собственно металлический механизм разрушения. При импульсном воздействии лазерного излучения на полупроводник для его заметного разрушения необходимо значительное превышение температуры нагрева по сравнению с температурой его плавления.

Изложенные закономерности хорошо согласуются с наблюдаемыми нами явлениями при разрушении минералов дозированным лазерным излучением.

Дальнейшие исследования необходимо сосредоточить на уточнении зависимости размеров и формы микролазерных кратеров от природы вещества минералов, на исследовании получаемых новообразований.

Морфология и другие особенности кратеров, получаемых на минералах при дозированном воздействии лазерного луча, могут оказаться интересными индикаторами в связи с отработкой режимов количественного лазерного микроспектрального анализа минерального сырья. Минералогическая природа анализируемого вещества, безусловно, очень существенно должна влиять на выбор мощности применяемого лазерного излучения и времени его воздействия на пробу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менке Г., Менке Л. Введение в лазерный эмиссионный микроспектральный анализ. М.: Мир, 1968. 250 с.
2. Шафранов Н.К., Кузнецов А.Г. О пирогенных стеклах, получаемых при воздействии лазерного луча на вулканические породы. — Зап. Всес. минерал. об-ва, 1974, ч. 103, N 2.
3. Шафранов Н.К., Кузнецов А.Г. О разрушении минералов лучом непрерывно действующего лазера. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1975, N 7.
4. Шафранов Н.К., Глухов Ю.Ю., Фролов Ф.Ф. Пирогенные изменения серноколчеданных руд в зоне действия луча лазера. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1975, N 8.
5. Шафранов Н.К., Глухов Ю.Ю., Кузнецов А.Г. Преобразование состава и физических свойств минерального вещества в зоне действия луча лазера. — Изв. вузов, Горн. журнал, 1978, N 4.
6. Шафранов Н.К., Кузнецов А.Г. О разрушении и преобразовании горных пород под воздей-

- ствием лазерного луча. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1980, N 5.
7. *Kramer W., Lange P., Sohrn W.* Laserexperimente zur Charakterisierung von Impaktprozessen. — *Ztschr. Geol. Wiss.*, 1981, vol. 9, N 2.
 8. *Зубринов И.И., Шелопут Д.В.* Эффект акусто-термической фокусировки лазерного луча в халькогенидных стеклах и прустите. — *Физ. твердого тела*, 1975, т. 17, N 3.
 9. *Галкин В.М., Ненашев Б.Г., Сербуленко М.Г.* Разрушение поверхности синтетического прустита лазерным излучением. — *Исслед. по эксперим. минерал.*, Новосибирск, 1978.
 10. *Anderson T.L., Newnham R.E., Cross L.E., Laughner J.W.* Laserinduced twinning in quartz. — *Phys. Status Solidi (a)*, 1976, vol. 37, N 1.
 11. *Lasers fear not Knaats.* — *Ind. Diamond Rev.*, 1980, March.
 12. *Лихачев А.П.* Лазерный способ исследования веществ при сверхвысоких температурах и давлениях. — *Геохимия*, 1978, N 10.
 13. *Балашов И.Ф., Лодин Г.Б., Лукин А.В.* и др. Портативный лазерный микропроботборник для полевых геологических исследований. — *Ж. прикл. спектроскопии*, 1979, т. 31, N 4.
 14. *Славинский М.П.* Физико-химические свойства элементов. М.: *Металлургиздат*, 1952, 763 с.
 15. *Косовец Ю.Г., Ставров О.Д.* Локальный спектральный анализ в геологии. М.: *Недра*, 1983.
 16. *Анисимов С.И., Имас Я.И., Романов Г.С.* и др. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: *Наука*, 1970.
 17. *Афанасьев Ю.В., Крохин О.Н.* Газодинамическая теория воздействия излучения лазера на конденсированное вещество. — *Квантовая радиофизика*. — *Тр. ФИАН*, 1970, т. 52.
 18. *Ашкинадзе Б.М., Владимиров В.И., Лихачев В.А.* и др. Разрушение прозрачных диэлектриков под воздействием мощного лазерного излучения. — *ЖЭТФ*, 1966, N 5.
 19. *Гринберг А.А., Мехтиев Р.Ф., Рывкин С.М.* и др. Поглощение лазерного излучения и разрушение в полупроводниках. — *Физ. твердого тела*, 1967, т. 9, N 5.