

УДК 622.765 + 621.373 + 533.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

**Н. А. Леоненко¹, Г. В. Секисов¹, А. Ю. Чебан¹, С. А. Шемякин²,
А. П. Кузьменко¹, И. В. Силютин²**

¹Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: leonenko@igd.khv.ru,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия
²Тихоокеанский государственный университет,
ЦКП Лазерные и оптические технологии, E-mail: siv@ele.khstu.ru,
ул. Тихоокеанская, 136, 680035, г. Хабаровск, Россия

Выполнен обзор работ по применению лазеров в горном деле для разрушения горных пород, приведены результаты экспериментальных исследований воздействия лазерного излучения на карбонатные породы с использованием непрерывного оптоволоконного иттербиевого источника лазерного излучения с выходной мощностью 600 Вт. Дана техническая оценка локальной дезинтеграции некоторых карбонатных пород с целью установления возможности и целесообразности разработки в дальнейшем технологических методов и средств добычи и переработки минерального сырья.

Лазерное излучение, оптоволоконный лазер, горные породы, энергоёмкость резания, интенсивность лазерного излучения

В современном мире общей и весьма характерной тенденцией в сфере науки и техники является интенсивное и результативное развитие исследований в области взаимодействия энергетических потоков с веществом с целью создания высокоэффективных технических средств и инновационных технологий. Данная тенденция наиболее отчетливо проявляется в области квантовой электроники и лазерной техники. Лазерные технологии все больше используются для обработки различных твердых материалов, рынок лазерных технологий весьма широк, наиболее мобилен и быстро развивается [1].

За полувековой период от создания лазера до практического внедрения готовых технологий ключевым моментом было и остается обеспечение высокоэффективного взаимодействия лазерного излучения с веществом, что предопределяет интенсивное развитие научных исследований и создание прогрессивных техники и технологий, в том числе в области взаимодействия лазерного излучения с горными породами. В данной области исследования выполнялись с конца 60-х гг. в США, СССР [2–5] и ряде других стран, при этом их большая часть проводилась с лазерами мощностью 0.5–1.0 кВт.

Статья подготовлена по гранту Российского фонда фундаментальных исследований № 13-05-00586 и проекту ДВО РАН № 12-III –А-08-179.

Однако к середине 80-х гг. интерес к этой проблеме значительно спал. Как отмечают некоторые авторы [6], это произошло из-за отсутствия: доступа исследователей к лазерам большой мощности (10 кВт и выше); передвижных лазерных систем; низкого эффективного КПД технологических газовых лазеров (применяемых в 80-е годы), который составлял порядка 3–5 %, в то время как современные волоконные лазеры имеют КПД до 30 %.

В самом конце минувшего столетия на международном форуме “Современные мощные лазеры и их применения” (ANPLA'99) в г. Осаке были представлены доклады о применении мощных лазеров в горном деле. Тогда впервые на профильной конференции появилась секция по лазерному бурению и разрушению горных пород. В основном это были доклады японских исследователей (Д. Сугимото и др.) из Университета Токай. Авторы [7–9], использовавшие непрерывный CO₂-лазер мощностью 13 кВт для сверления отверстий в туфе и граните, отмечают: при лазерном сверлении гранита скорость проходки снижалась с 1.8 до 0.7 мм/с при увеличении глубины шурфа от 3 до 12 см. Средняя скорость проходки шурфа глубиной порядка 8 м (при использовании излучения CO₂-лазера мощностью 50 кВт) составляла 2.76 мм/с в туфе и 1.23 мм/с в граните. Скорость лазерной проходки туфа в 2 раза выше, чем скорость проходки при механическом сверлении.

Эксперименты по лазерной резке песчаника и гранита излучением CO₂-лазера мощностью до 10 кВт выполнялись К. Нагаи (корпорация Тайсей, Япония). Скорость резки достигала 3 м/мин при толщине реза 10 мм; максимальная толщина реза составляла 63 мм при мощности излучения 10 кВт и скорости резки 1.7 мм/с. Также показано преимущество комбинированного метода сверления гранита: за воздействием лазерного излучения, которое вызывает растрескивание породы и делает ее более хрупкой, следует механическое сверление (диаметр сверла до 2 см).

Двухлучевая YAG-лазерная система с суммарной мощностью излучения 6 кВт использовалась М. Сато (Геофизическая исследовательская лаборатория Японии) при выполнении натуральных экспериментов в горных условиях. В течение 7 мин лазерным излучением просверлено отверстие диаметром 2 см в слое породы толщиной 20 см при скорости резки 0.5 мм/с.

В 1994 г. в США принята программа по перенесению технологий “холодной войны” в американскую промышленность, тогда стали возможными исследования лазерного бурения скважин. Появились научные работы американских ученых Р. Грейвз, Д. О’Брайен (из Горного университета Колорадо). На полигоне Белые пески (White Sands) проводились работы по взаимодействию с горными породами излучения HF(DF)-лазера MIRACL мощностью 0.5–1.2 МВт. Исследования показали, что скорость проходки скважин при лазерном бурении может быть увеличена на порядок по сравнению с традиционными методами, что вызвало новый интерес к проблеме использования лазеров в горном деле [10].

Выполнен двухлетний (1997–1999 гг.) совместный российско-американский проект по установлению взаимодействия лазерного излучения с горными породами, характерными для нефтеносных полей [11], с использованием инфракрасных СО- и СО₂-лазерных установок. Проект направлен на оценку возможности создания лазерных буровых установок. Вместе с учеными Горного университета штата Колорадо (Colorado School of Mines), Научно-исследовательского института газа (Gas Research Institute), в настоящее время — Институт технологии газа — Gas Technology Institute (GTI), штат Иллинойс, в реализации проекта участвовали и российский ученые [12]: из Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (лаборатории газовых лазеров), а также Московского государственного горного университета [13, 14]. При этом экспериментально исследовано взаимодействие излучения импульсных СО- и СО₂-лазеров с горными породами, типичными для нефтяных месторождений — песчаником, известняком, сланцем и гранитом.

Плотность энергии и интенсивность лазерного излучения на поверхности образцов составляли до 1 кДж/см^2 и 10^7 Вт/см^2 соответственно. Процесс формирования лазерного факела на поверхности образцов фиксировался методом высокоскоростной фотографии, при этом измерялась скорость распространения фронтов лазерного факела.

Установлены различия процессов, происходящих в силикатных горных породах под действием излучения СО- и СО₂-лазеров. Авторами [15] проанализированы инфракрасные спектры отражения и поглощения поверхности горных пород до и после лазерной обработки.

До недавнего времени при обработке материалов в основном применялись мощные СО₂-лазеры. Создан альбом технологий промышленных лазерных станков на основе СО₂-лазеров, отражающий условия качественной резки для широкого набора материалов. Однако СО₂-лазеры громоздки, не имеют волоконного выхода, не обладают высокой эффективностью и качеством пучка и по этим параметрам уступают волоконным лазерам, появление которых ознаменовало прорыв в лазерной физике [16]. В течение немногих лет выходная мощность этих лазеров была увеличена с нескольких сотен ватт до нескольких десятков киловатт. Как отмечено в [17], для технологических волоконных лазеров подобный альбом пока только формируется, и технологи производств, где внедряются лазерные технологии обработки материалов, сталкиваются с проблемами выбора параметров волоконных лазеров, наиболее подходящих для задач конкретного производства. Причем альбом технологий волоконных лазерных установок формируется в основном для различных металлов и полимерных материалов.

В России исследования воздействия лазерного излучения на горные породы (в основном силикатные при действии инфракрасного излучения СО- и СО₂-лазера) проводятся более 30 лет учеными ряда научных организаций Российской академии наук: Физическим институтом им. П. Н. Лебедева РАН, Институтом общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Институтом проблем лазерных и информационных технологий РАН, а также Московским государственным горным университетом.

В Институте горного дела ДВО РАН совместно с Тихоокеанским государственным университетом (г. Хабаровск) выполняются исследования, направленные на разработку лазерных технологий в горном деле [18–25]. В настоящее время исследования ведутся с использованием иттербиевой оптоволоконной лазерной установки непрерывного действия с максимальной выходной мощностью 600 Вт (производства НТО “ИРЭ-Полус” — дочернее предприятие фирмы IPG Photonics Corporation). Оборудование для исследований предоставлено Центром коллективного пользования “Лазерные и оптические технологии” (ЦКП “ЛОТ”) ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, г. Санкт-Петербург. Его деятельность направлена на содействие решению задач, выполняемых в рамках приоритетных направлений развития образования, науки, создания технологий и техники в Российской Федерации.

Непрерывные волоконные лазеры характеризуются высокой эффективностью (до 30 % — от розетки и до 70–80 % — при оптической накачке), компактностью, надежностью и качеством пучка. Значительная величина отношения поверхности к объему активного волоконного световода весьма упрощает систему охлаждения мощных волоконных лазеров. Масштабы реализованного и потенциального применения мощных волоконных лазеров относительно велики. Они используются для обработки материалов (резка металлических и пластиковых листов, сварка, сверление и т. д.) в автомобильной, авиакосмической и других отраслях промышленности.

Институт технологии газа (GTI) [10] выдвинул идею использования мощных волоконных лазеров для резки и разрушения горных пород. Подтверждением состоятельности данной концепции явилась работа, завершенная в 2006 г., по использованию волоконного лазера для туннели-

рования через кремнистые и карбонатные породы, а также реализация лазерного бурения в песчаниках и известняках с низким энергопотреблением [10, 26, 27]. На сайте научно-технической информации Департамента энергетики США www.osti.gov можно ознакомиться с отчетом GTI.

После первоначальных и успешных исследований, проведенных ранее с использованием мощных лазерных установок [11, 14], GTI осуществляет исследования с коммерчески доступными промышленными лазерными установками. Результаты исследований показали, что оптоволоконные промышленные иттербиевые лазерные установки способны удалять горную породу с уровнем энергии, сравнимым с существующим механическим способом [27]. Волоконные лазеры стали ведущим коммерческим техническим средством, применяемым при добыче, туннелировании, резке, сверлении горных пород и бетона.

С помощью оптоволоконных линий иттербиевые лазерные установки позволяют передавать энергию для резки горных пород на расстояние от 5 до 200 м (до удаленных целей) с определенной точностью. Эксперименты проводились с использованием волоконных лазеров фирмы IPG Photonics (Оксфорд, МА; www.ipgphotonics.com), мощностью 3.0 и 5.34 кВт. При этом установлено: волоконный лазер эффективнее лазеров других типов при бурении скважин в известняке и песчанике [27]. Лабораторные эксперименты проводились на блоках известняка и песчаника размерами 50.8×12.7×12.7 см. Например, проникновение лазерного луча в глубину песчаника от волоконного лазера мощностью 3.0 кВт достигало 7.6 см; диаметр отверстия составлял 2.54 см, время воздействия 62 с. Исследования проводились сфокусированным излучением.

В настоящее время компания GTI отмечает снижение затрат на буровые и разведочные работы (с 2011 г.) благодаря применению лазерной энергии, возможно из-за достижения мощности волоконных источников уже до 50 кВт. Отмечается также снижение нагрузок на окружающую среду.

Учитывая, что по скорости лазерной резки горных пород можно оценить уровень производительности лазерных технологических устройств, в настоящей работе дается оценка возможности локальной лазерной дезинтеграции карбонатных пород с целью дальнейшей разработки геотехнологических методов, обладающих энергетической, экономической эффективностью и экологической безопасностью. Результаты исследований, выполненные в ИГД ДВО РАН и Тихоокеанском государственном университете, описаны ниже.

Лазерная дезинтеграция осуществлена на образцах горных пород Лондоковского месторождения (Еврейская автономная область), известняка (участка “Сопка I-II”) и доломита розового. Плотность известняка 2.32 т/м³, категория крепости 8 по шкале М. М. Протодяконова, морозостойкость Мрз — 100, 200, прочность до 60 МПа; плотность доломита — 2.77 т/м³, категория крепости — 10, морозостойкость Мрз — 100, 200, 300, прочность до 80 МПа.

Образцы-параллелепипеды длиной и шириной 40 мм вырезались из горного массива. При экспериментальных исследованиях каждый образец устанавливался в тисы стола с автоматически регулируемой подачей. Скорость подачи образцов при резке лазерным излучением составляла соответственно 2.0, 1.0 и 0.5 мм/с.

Исследования проводились с использованием волоконного иттербиевого лазера ЛС-06 (производства НТО “ИРЭ-Полюс”) с выходной мощностью лазерной технологической установки 600 Вт. Лазер работал в режиме непрерывного излучения с длиной волны 1070 нм. Локальная дезинтеграция горных пород при их резании осуществлялась с помощью выходного коннектора QВН-типа диаметром 50 мкм. Расстояние от выходного коннектора до поверхности

резания составляло 4 мм; мощность излучения варьировалась пошагово от 25 до 95 % номинальной мощности лазерной установки – 150, 300, 450 и 570 Вт; максимальная плотность мощности на поверхности карбонатных пород составляла $15 \cdot 10^6$ Вт/см², минимальная — $4 \cdot 10^6$ Вт/см².

При каждом режиме резания (с определенной скоростью и мощностью излучения) выполнена серия из трех экспериментов, т. е. в общей сложности для 12 режимов резания (три скорости с четырьмя вариантами мощности излучения) каждого типа горной породы проведено по 36 экспериментов. По завершении резания измерялась его глубина с точностью до 0.1 мм. Для повышения точности измерений глубина реза (40 мм) условно делилась на отрезки по 10 мм, в каждом из них определялась наименьшая и наибольшая глубина проникновения лазерного луча. В местах наличия микротрещин или включений других элементов глубина проникновения луча отклонялась на 0.5–2 мм от среднего значения. По результатам восьми измерений (для каждого из трех образцов) определялась средняя глубина реза образца на конкретном режиме резания с точностью до 0.01 мм. В процессе экспериментальных исследований установлены основные режимы, параметры лазерного излучения и последовательность его воздействия на образцы.

С увеличением мощности лазерного излучения глубина реза закономерно возрастала (близко к линейной, рис. 1).

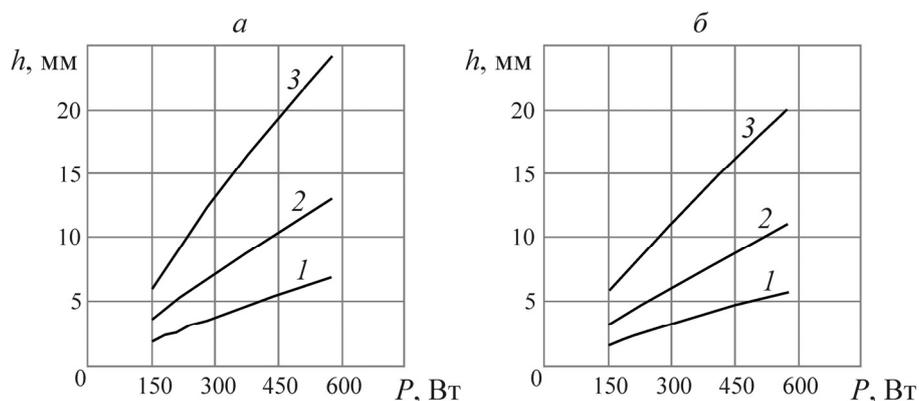


Рис. 1. Зависимость глубины реза (h) горной породы лазерным излучением от мощности лазерного излучения (P): a — известняк, b — доломит; скорость резания породы, мм/с: 2.0 — (1); 1.0 — (2); 0.5 — (3)

Так, если при скорости резания известняка 0.5 мм/с лазерным излучением мощностью P , равной 150 Вт, глубина реза (h) составляла 6.90 мм (рис. 1а); при увеличении мощности вдвое (до $P = 300$ Вт) она возрастала до 13.27 мм, т. е. почти вдвое, или на 92 %. При увеличении мощности втрое (до $P = 450$ Вт) глубина реза составила 19.44 мм, или 182 %.

При мощности лазерного излучения 570 Вт глубина реза достигла 24.15 мм, что составило 250 %. Некоторое отставание прироста глубины реза по сравнению с приростом мощности излучения можно объяснить дополнительными затратами энергии на разогрев образцов, структурными неоднородностями карбонатных пород; шероховатостью поверхности и отклонением фокусного расстояния от поверхности образцов.

Доломит по сравнению с известняком имеет большую плотность (на 17 %) и прочность (на 25 – 33 %). Глубина реза образца доломита лазерным излучением при равных условиях существенно меньше, чем известняка. Так, при скорости резания образцов 0.5 мм/с и мощности лазерного излучения 570 Вт глубина реза известняка 24.15 мм, а доломита — 20.05 мм, т. е. на 17 % меньше.

После дезинтеграции образцов определялась площадь полученного реза (S). Энергоемкость (E) вычислялась как произведение мощности лазерного излучения P на время резания t . Время резания образца в зависимости от скорости резания (v) изменялось от 20 до 80 с.

Эффективность локальной лазерной дезинтеграции может быть выражена таким показателем, как удельная энергоемкость резания, равная отношению энергоемкости процесса резания к площади полученного реза. Основные результаты экспериментальных исследований лазерного резания образцов горных пород представлены в таблице.

Параметры резания образцов известняка и доломита

Мощность излучения, Вт	Время резания, с	Глубина реза, мм		Площадь реза, мм ²		Энергоемкость резания известняка и доломита, Дж	Удельная энергоемкость резания, Дж/мм ²	
		известняк	доломит	известняк	доломит		известняк	доломит
Скорость резания образцов 2 мм/с								
150	20	1.91	1.63	76.4	65.2	3000	39.26	46.01
300	20	3.70	3.15	148.0	126.0	6000	40.54	47.62
450	20	5.45	4.64	218.0	185.6	9000	41.28	48.49
570	20	6.81	5.80	272.4	232.0	11400	41.85	49.14
Скорость резания образцов 1 мм/с								
150	40	3.62	3.09	144.8	123.6	6000	41.44	48.54
300	40	7.02	5.98	280.8	239.2	12000	42.74	50.16
450	40	10.37	8.79	414.8	351.6	18000	43.39	51.19
570	40	12.98	10.96	519.2	438.4	22800	43.91	52.01
Скорость резания образцов 0.5 мм/с								
150	80	6.90	5.79	276.0	231.6	12000	43.48	51.81
300	80	13.27	11.12	530.8	444.8	24000	45.21	53.96
450	80	19.44	16.24	777.6	649.6	36000	46.29	55.42
570	80	24.15	20.05	966.0	802.0	45600	47.20	56.86

Удельная энергоемкость резания горных пород зависит как от скорости резания, так и от мощности излучения. С увеличением скорости резания удельная энергоемкость процесса снижается (рис. 2) и при мощности излучения 450 Вт для известняка при скорости 2 мм/с составляет соответственно 41.28 Дж/мм²; 0.5 мм/с — 46.29 Дж/мм², т. е. возрастает на 12 %.

При одинаковых режимах резания удельная энергоемкость резания образца доломита больше, чем известняка: при мощности излучения 450 Вт удельная энергоемкость резания доломита при скорости 1 мм/с составляет 51.19 Дж/мм², а известняка — 43.39 Дж/мм², что на 18 % больше.

С использованием электронного микроскопа “LEO EVO 1455VPSE” (Карл Цейс, Германия) выполнены целевые исследования поверхностей карбонатных пород до и после локальной лазерной дезинтеграции. Электронный микроскоп оснащен энергодисперсионным анализатором “INCA-ENERGY” для проведения локальных качественных и количественных элементных химических анализов. Чувствительность метода составляет 0.1 %; ширина электронного пучка 20–30 нм, глубина проникновения 1 мкм.

Элементный химический состав устанавливался в локально ограниченных поверхностных зонах образцов известняка и доломита по энергодисперсионным количественным спектраль-

ным значениям. Исходные изображения электронной микроскопии известняка и доломита представлены на рис. 3 с расчетным гипотетическим элементарным составом в локальных поверхностных зонах.

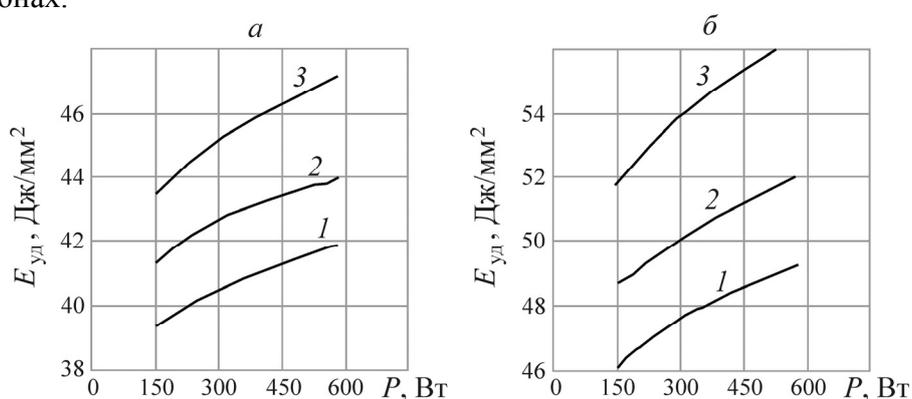


Рис. 2. Зависимость удельной энергоёмкости ($E_{уд}$) локальной дезинтеграции образцов известняка (а) и доломита (б) от мощности лазерного излучения (P): скорость резания породы, мм/с: 2.0 — (1); 1.0 — (2); 0.5 — (3)

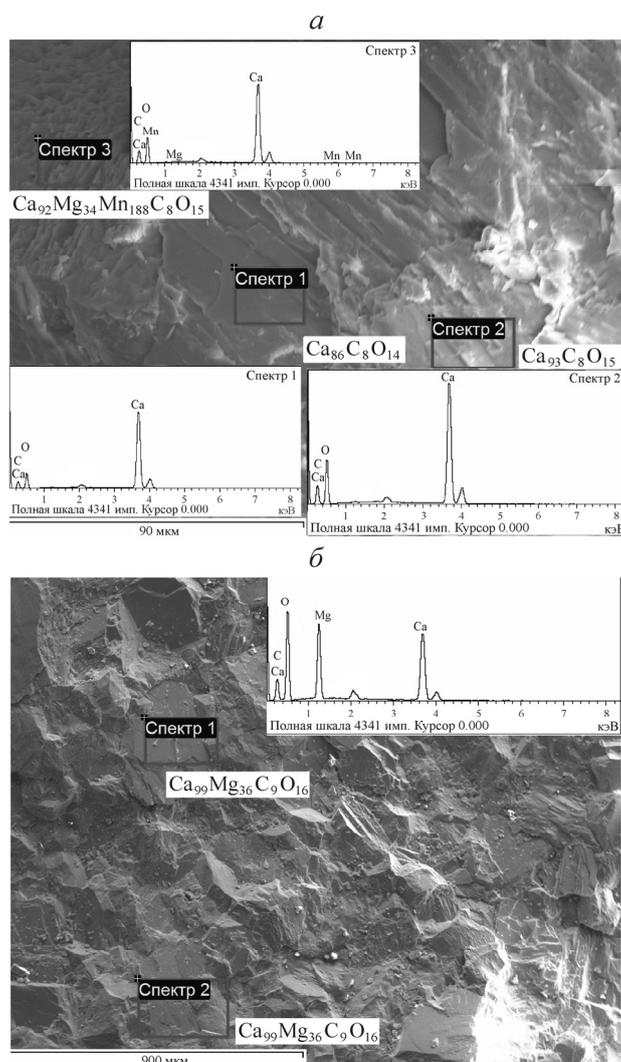


Рис. 3. Растровые электронные изображения исходных образцов горных пород: а — известняк; б — доломит

В пересчете по стехиометрическому кислороду содержание оксида кальция в исходных известняках составляло от 30 до 49 %, диоксида углерода — от 58 до 70 %; содержание примесных элементов марганца и магния — менее 0.3 %.

Исходный доломит содержал равное количество оксидов кальция и магния — 13 %, диоксида углерода — 75 % при аналогичных параметрах обработки спектрограмм, что и для известняка.

Визуализация микроскопических наблюдений (фото на рис. 4) указывает на значительные отличия поверхности исходного образца, не подвергавшегося лазерному излучению (спектр 1), от поверхности образца после лазерной обработки (спектр 2).

Следует отметить, что при увеличении интенсивности лазерного излучения от $4 \cdot 10^6$ до $8 \cdot 10^6$ Вт/см² на образцы энергодисперсионные спектры кальция, углерода и кислорода изменяются незначительно (спектрограммы 1, 2 на рис. 4). Количественный состав оксидов щелочно-земельных элементов (Ca, Mg) поверхностного слоя, дезинтегрированного лазерным излучением, увеличивается всего на 2–3 %.

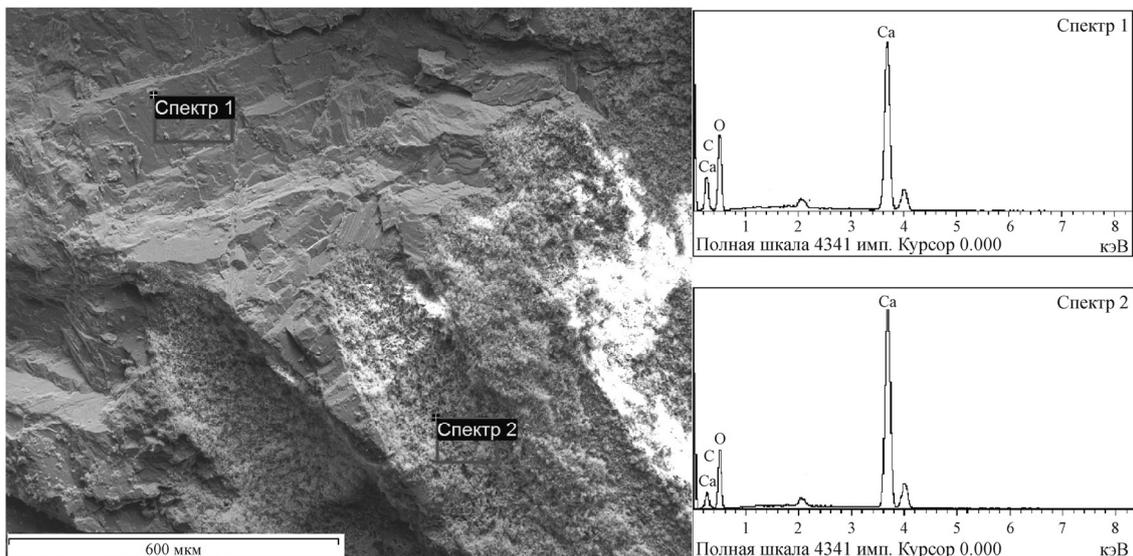


Рис. 4. Растровое электронное изображение образца известняка после обработки лазерным излучением мощностью 150 Вт, а также спектрограммы локально-ограниченных областей

Скоростной лазерный нагрев исследуемых пород с последующим охлаждением в естественных условиях приводит к образованию поверхностных фрактальных структур, содержащих, помимо исходных, такие элементы, как K, Al, Si, Zr (рис. 5).

При интенсивности воздействующего лазерного излучения $15 \cdot 10^6$ Вт/см² в приповерхностном слое карбонатных образцов углерод полностью выгорает (рис. 6), что объясняется достижением предельных значений термических напряжений в кристаллической решетке в зоне локальной дезинтеграции.

Отметим, что оценка локальной дезинтеграции горных пород проведена с применением волоконного лазера с максимальной выходной мощностью 600 Вт. Максимальная интенсивность лазерного излучения составляла $15 \cdot 10^6$ Вт/см² при диаметре сфокусированного излучения 70 мкм. Удельная энергоёмкость локальной дезинтеграции карбонатных пород варьировала от 40 до 60 Дж/мм² при заданных скоростных режимах 2–0.5 мм/с соответственно.

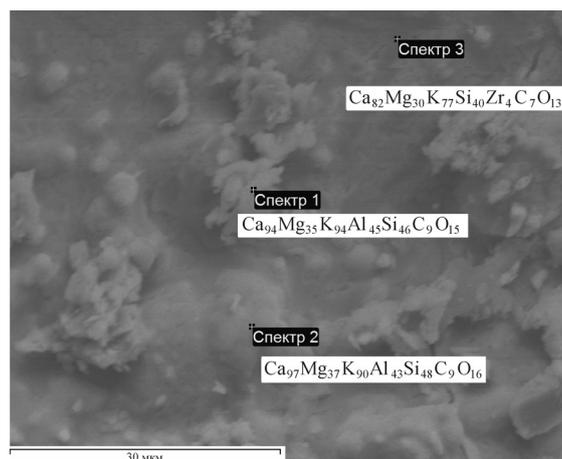


Рис. 5. Растровое электронное изображение образований фрактальных структур на поверхности карбонатных пород, возникших при лазерном воздействии

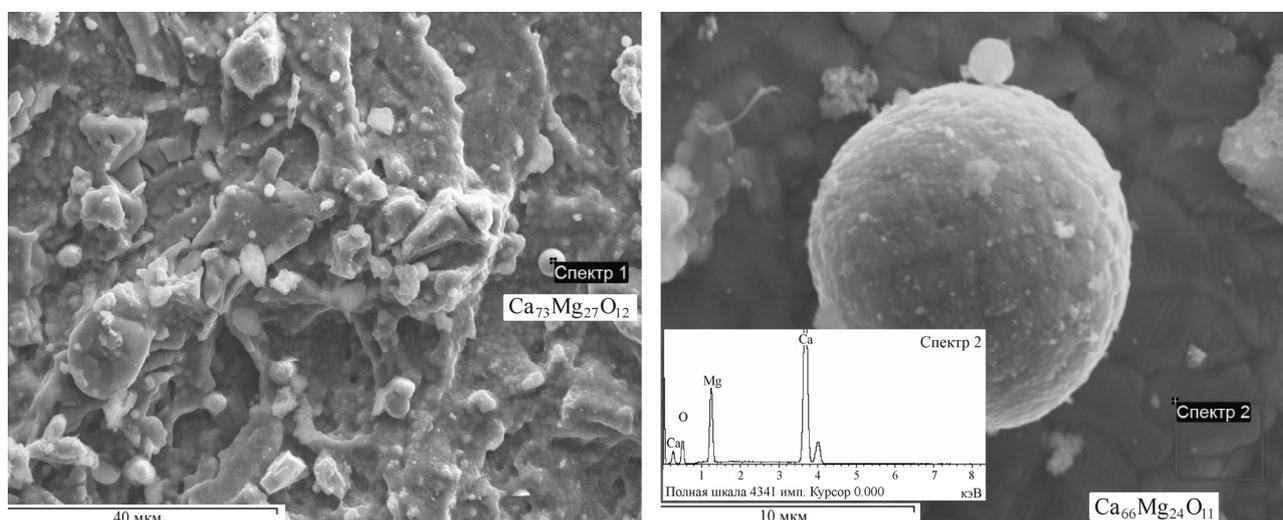


Рис. 6. Фрактальные структуры карбонатных пород с полностью выгоревшим углеродом на поверхности после воздействия лазерного излучения интенсивностью $80 \cdot 10^6$ Вт/см²

ВЫВОДЫ

Волоконные лазеры открывают новые направления в обработке материалов и имеют неограниченное промышленное применение. В настоящее время серийно выпускаются волоконные лазеры мощностью от 100 Вт до 10 кВт. Мировая тенденция такова, что мощные волоконные лазеры мощностью от 3 до 10 кВт занимают все больший сектор рынка лазерного промышленного оборудования. Они превосходят другие типы лазеров практически по всем параметрам, важным с точки зрения их промышленного использования: не требуют юстировок оборудования, высококвалифицированного обслуживания, через промышленные интерфейсы могут подключаться к компьютерным системам с числовым программным управлением технологического оборудования.

Мощные лазеры вполне могут интегрироваться в технологические процессы горного производства благодаря низкому энергопотреблению, простоте эксплуатации, высокому эксплуатационному ресурсу.

Проведенные исследования позволяют более обоснованно подходить к выбору рационального режима локальной дезинтеграции горных пород лазерным излучением, а также дают качественную и количественную оценку элементарных химических преобразований, происходящих при быстропотекающих термических процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лазерные технологии** обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. — М.: Физматлит, 2009.
2. **Мухамедгалиева А. Ф., Бондарь А. М., Зиборова Т. А., Баранов Р. И., Панин М. И.** Исследование воздействия излучения непрерывно действующего CO₂-лазера на минералы группы кварца и кварцсодержащие горные породы // Квант. электроника. — 1975. — Т. 2. — № 1.
3. **Мухамедгалиева А. Ф., Бондарь А. М., Зиборова Т. А.** Эффект “деформации” спектра инфракрасного поглощения микроклина (KAlSi₃O₈) излучением CO₂-лазера // ЖТФ. — 1976. — Т. 46. — Вып. 4.
4. **Мухамедгалиева А. Ф., Бондарь А. М.** Лазерно-стимулированные реакции на поверхности кварца и некоторых минералов // Поверхность. Физика, химия, механика. — 1983. — № 5.
5. **Мухамедгалиева А. Ф.** Структурные превращения на поверхности синтетических и природных силикатов, инициируемые инфракрасным лазерным излучением: дис. д-ра физ.-мат. наук. — М.: 2002.
6. **Афанасьев Ю. В., Завестовская И. Н., Зворыкин В. Д., Ионин А. А., Сенатский Ю. В., Стародуб А. Н.** Международный форум “Современные мощные лазеры и их применения” (ANPLA'99) // Квант. электроника. — 2000. — Т. 30 (5).
7. **Голубев В. С.** Лазерные макротехнологии: современное состояние и тенденции развития // Перспективные материалы. — 2005. — № 1.
8. **Sigimoto D. et al.** Performance of high power lasers for rock excavations, Proc. SPIE 3887, 2000.
9. **Matsuno K.** High power lasers in Japan National Projects, Proc. SPIE 4831, 2003.
10. **Brian C., Gahan P.E., Dr. Samih Batarseh.** Laser drilling — drilling the power of light, Report, Continuation of fundamental research and development, 2003 – 2004. – Дата обновления 15.08.2012. – URL: www.osti.gov (дата обращения: 15.08.2012).
11. **Graves R.** Metal, Proc. SPIE 3885 159, 2000.
12. **Ионин А. А.** Мощные системы инфракрасных и ультрафиолетовых лазеров и их применение // Успехи физ. наук. — 2012. — Т. 182. — № 7.
13. **Graves R., Ionin A. A., Klimachev Yu. M., Mukhamedgalieva A. F., O'Brien D., Sinitsyn D. V., Zvorykin V. D.** Interaction of pulsed CO and CO₂-laser radiation with rocks, Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 2000, Vol. 4065.
14. **О'Брайен Д., Грейвс Р., Зворыкин В. Д., Ионин А. А., Климачев Ю. М., Мухамедгалиева А. Ф., Сеницын Д. В., Терехов Ю. В.** Взаимодействие излучения импульсных СО- и СО₂-лазеров с горными породами, характерными для нефтяных месторождений. II. Газодинамические процессы при лазерно-индуцированной абляции и трансформация ИК-спектров поглощения и отражения горных пород // Физика и химия обработки материалов. — 2005. — № 1.
15. **Мухамедгалиева А. Ф., Бондарь А. М., Ионин А. А., Климачев Ю. М., Сеницын Д. В., Зворыкин В. Д.** Особенности лазерной абляции кварца, силикатных минералов и горных пород, индуцированной излучением импульсных СО- и СО₂-лазеров // Физика и химия обработки материалов. — 2008. — № 4.
16. **Дианов Е. М.** Волоконные лазеры // Успехи физ. наук. — 2004. — Т. 174.
17. **Стрельцов А. П., Петровский В. Н.** Выбор параметров лазера для качественной резки // Лазерное оборудование. — 2007. — № 3.

18. Жуков Е. А., Илюшин М. А., Кузьменко А. П., Леоненко Н. А. Лазерное инициирование энергонасыщенных составов // Зап. горного института. — СПб.: Изд-во СПбГИ. — 2001. — Т. 148 (1).
19. Патент № 2196122 РФ, МПК7 С 06 В 33/00, 43/00. Энергонасыщенный светочувствительный состав для лазерной системы инициирования / Н. А. Леоненко, Н. А. Павлова, Е. А. Жуков, А. П. Кузьменко; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. — № 2001108515/02; заявл. 30.03.00; опубл. 10.01.03. — Бюл. № 1.
20. Патент № 2255995 РФ, МПК 7 С 22 В 11/00, 1/00. Способ лазерного формообразования и обогащения благородных металлов в минеральных ассоциациях / Е. Б. Шевкун, А. П. Кузьменко, Н. А. Леоненко, Н. Г. Ятлукова, Н. А. Кузьменко; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН, Тихоокеанский гос. ун-т. — № 003135458/02(037974); заявл. от 04.12. 03, опубл. 10.07.05. — Бюл. № 19.
21. Патент № 2413779 РФ, МПК С 22 В 11/02, В 22 F 1/00. Способ извлечения дисперсного золота из золотосодержащего высокоглинистого минерального сырья / Н. А. Леоненко, А. П. Кузьменко, И. В. Силютин, И. Ю. Рассказов, Г. В. Секисов, М. А. Гурман, Г. Г. Капустина, Н. Л. Швец; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН, Тихоокеанский гос. ун-т. — № 2010113683/02; заявл. 07.04.10; опубл. 10.03.11. — Бюл. № 7.
22. Kuzmenko A. P., Leonenko N. A., Kharchenko V. I., Kuz'menko N. A., Silyutin I. V., Khrapov I. V. Thermocapillary mechanism of laser stimulated agglomeration of ultra-disperse and colloidal ionic gold, ISSN 1063_7850, Technical Physics Letters, 2009, Vol. 35, No. 9.
23. Кузьменко А. П., Рассказов И. Ю., Леоненко Н. А., Капустина Г. Г., Силютин И. В., Ли Цз., Кузьменко Н. А., Храпов И. В. Термокапиллярный механизм извлечения и лазерная агломерация ультрадисперсного и коллоидно-ионного золота из минеральных и техногенных комплексов // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.
24. Леоненко Н. А. Обоснование создания лазерных оптических систем для управления процессами минеральной подготовки // ГИАБ. — М.: МГГУ, 2012. — № 4.
25. Леоненко Н. А., Ванина Е. А., Гальцов А. А., Капустина Г. Г., Силютин И. В. Терморadiационная активация и формирование упорядоченных структур в дисперсных минеральных средах при лазерном воздействии // Физика и химия обработки материалов. — 2011. — № 2.
26. Институт технологии газа. Отчеты, публикации. Отчет за 2012 г. — Дата обновл. 15.08.12. URL: http://www.gastechnology.org/media.godashboard.com/gti/AnnualReport/GTI_AnnualReport2011_fnl_lowres.pdf (дата обрац. 15.08.12).
27. Брайн, С. Гаан. Перспективы волоконных лазеров в обработке горных пород и материалов Земли. Компания E & P Technology Development, Центр разведки добычи газа Технол. ин-та, Дес-Плейнс, штат Иллинойс / пер. с англ. яз. Brian C. Gahan. Processing rock. — Дата обновл. 15.08.12. — URL: <http://www.industrial-lasers.com/articles/2005/09/processing-rock.html> (дата обрац. 15.08.12).

Поступила в редакцию 13/V 2013