

УДК 622.765+621.373+533.1

Г.Г. Капустина

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ СРЕДЫ***

Исследовано воздействие непрерывного лазерного источника на минеральные среды, содержащие золото, не извлекаемое гравитационными методами. Установлено образование различных структурных поверхностей золота, выявлены общие закономерности агломерирования и концентрирования субмикронного золота.

Ключевые слова: лазерное излучение, ультрадисперсное золото, золотосодержащий минеральный продукт, структурная упорядоченность.

В течение многих десятилетий разрабатывались простые по геологическому строению и условиям обработки богатые и легкообогащаемые россыпи. Но на сегодняшний день в результате интенсивной эксплуатации эти россыпи заметно истощены. Поэтому для добычи золота вовлекаются новые типы россыпей, ранее не относившиеся к промышленным объектам, — элювиальные и аллювиальные, литоральные и техногенные. Это россыпи более сложного строения, с содержанием золота в мелкой фракции. Вовлечь в переработку ценные компоненты, имеющие субмикронные и ультрадисперсные размеры частиц традиционными способами практически невозможно. Требуется поиск новых технологических решений, основанных на результатах фундаментальных и прикладных исследованиях. Одним из направлений таких исследований является энергетическое воздействие на тонкодисперсные минеральные среды: электрохимическая обработка, обра-

ботка потоком ускоренных электронов, ультразвуком, мощными электромагнитными импульсами, а также сверхвысокочастотная и магнитно-импульсная обработки и др. [1] Одним из перспективных методов энергетического воздействия является лазерная обработка материалов, которая обеспечивает высокую производительность и точность, экономит энергию.

В основе лазерной обработки материалов лежит способность лазерного излучения создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, достаточные для нагрева, плавления или испарения практически любого материала. Это связано с термическим эффектом поглощения излучения непрозрачными твердыми телами [2].

Для исследования были подготовлены минеральные алюмосиликатные пробы с высокоглинистой россыпи р. Гайфон (верхнее Приамурье), с содержанием дисперсного золота, и модельные образцы, с введением кол-

* Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственному контракту на выполнение научно-исследовательских работ от 29 апреля 2011 г. № 16.552.11.7027 с Министерством образования и науки России.

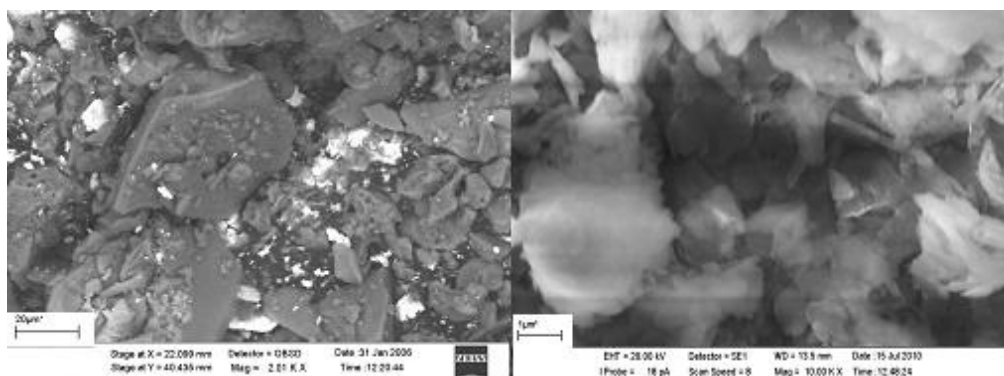


Рис. 1. Исходные модельные образцы высокоглинистых песков с коллоидно-ионным золотом до лазерной обработки

лоидного и ионного золота. Золото в дисперсной форме существенно отличается своими физико-химическими свойствами от силикатных, сульфидных и прочих минералов, содержащихся в образцах, что позволяет сделать вывод о различном их поведении при воздействии лазерного излучения на золотосодержащие минеральные объекты.

Источником мощного потока энергии служил иттербиевый волоконный лазер ЛС-06 непрерывного действия. Оптические характеристики экспериментальной установки следующие: мощность после выходного коннектора 600 Вт, режим работы непрерывный, частота модуляции выходной мощности до 5 кГц, длина волны $\lambda = 1070$ нм.

Образцы в рассыпном виде, с толщиной слоя 3 мм, помещались на специальную графитовую подложку. Над графитовой подложкой размещалась оптическая головка, благодаря которой создавалась возможность задавать параметры расфокусированного излучения. Лазерное излучение, пройдя по иттербиевому оптоволокну и через оптическую головку, размещенную вертикально и жестко закрепленную на штативе, попадало на исследуемые образцы.

Движение подложки осуществлялось со скоростью 1 мм/с. Диаметр расфокусированного излучения подбирался эмпирически и составлял 7 мм. В ходе эксперимента мощность излучения варьировалась от 60 до 270 Вт. В результате были получены спеки из глинистых алюмосиликатных частиц.

Вещественный состав направленного изменения свойств образцов изучен с помощью рентгеноспектрального микроанализа, атомно-силовой и электронной микроскопии, проведен масс-спектрометрический анализ с индуктивно-связанной массой. Образы исследованы до и после лазерной обработки.

На рис. 1 представлены электронные растровые изображения исходных золотосодержащих высокоглинистых образцов с коллоидно-ионным золотом, полученные с помощью растрового электронного микроскопа «LEO EVO 40HV» (Карл Цейс, Германия) с использованием энергодисперсионного анализатора, который позволяет выявить фазовую неоднородность образцов.

Изображения электронного микроскопа позволяют сделать вывод, что исходный образец имеет разную фазовую микрон неоднородность. Фазы

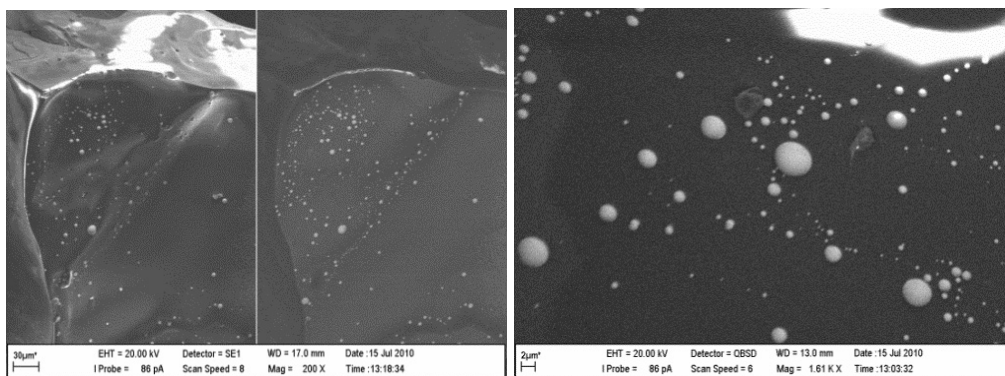


Рис. 2. Агломерированное золото сферической формы на поверхности алюмосиликатных стеков после воздействия на модельные высокоглинистые образцы непрерывного источника лазерного излучения мощностью излучения 60 Вт и 130 Вт

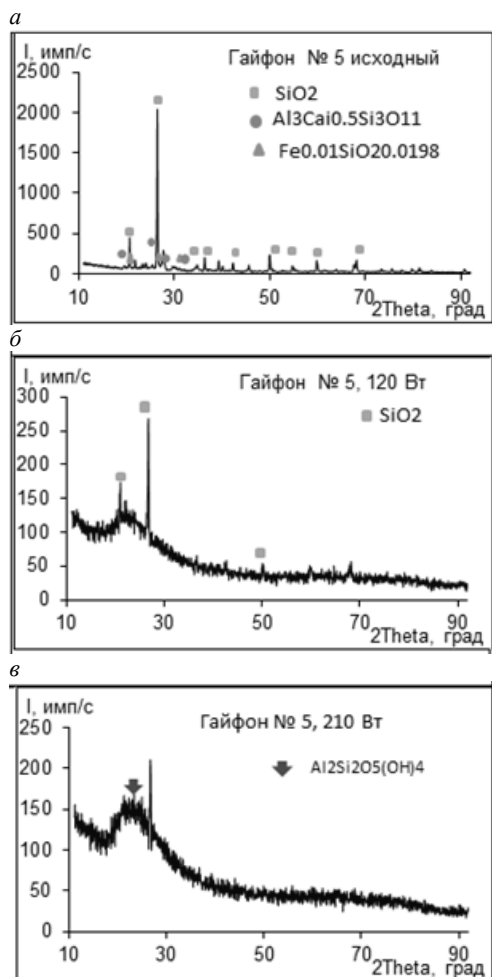


Рис. 3. Дифрактограмма образца а — исходного; б — после воздействия лазерного излучения мощностью 120 Вт; в — после воздействия лазерного излучения мощностью 210 Вт

с более высоким средним атомным числом выражены в более ярком контрасте по сравнению с фазами с меньшим атомным числом. Исследованиями фазовой микронеоднородности методом растровой электронной микроскопии установлено, что основной структурной составляющей в исходных образцах являются силикаты в виде кварца, цеолита и глины. Присутствуют тонкодисперсные и ультрадисперсные золотосодержащие частицы с размерами микронного уровня. Снимки электронной микроскопии позволяют сделать вывод, что золото имеет аморфные формы, размерами 10 микрон.

В результате лазерного воздействия на данные образцы наблюдается формирование структурных форм, размерами до 300 микрон.

Рентгеноструктурные исследования поверхности образцов проводились с помощью дифрактометра ДРОН-7 (НПП «Буревестник»). На рис. 3 представлены рентгеновские дифракто-

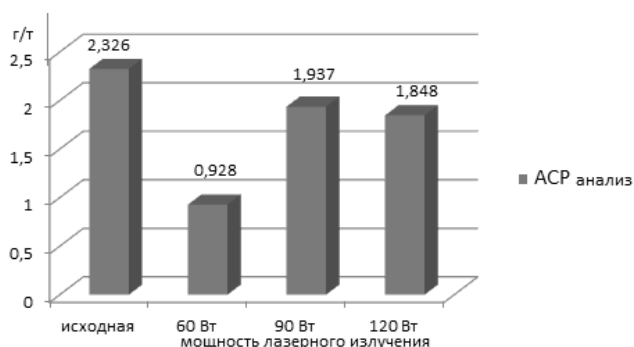


Рис. 4. Диаграмма ААСР-анализа в индуктивно связанной плазме

граммы для исходного образца и после лазерного воздействия. Основные пики исходного материала соответствуют кварцу SiO_2 . Кроме того, в небольшом количестве присутствуют сложные оксиды алюминия, кальция, железа и кремния. На рентгенограмме после лазерной обработки наблюдается уменьшение интенсивности пиков почти в 10 раз (что соответствует фазе нового вещества $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), образуется область рентгеновского «гало», что свидетельствует о начале трансформации материала в стеклообразную фазу, базисная линия стала более широкой, а оксид кремния и другие элементы исчезли, так как при большой мощности происходит испарение. Таким образом, в результате увеличения мощности лазерного воздействия высокоглинистые пески переходят из кристаллической фазы в аморфную.

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой позволяет определить количественный состав золота в минеральных образцах (рис. 4).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что под воздействием лазерного излучения в минеральных средах возникают быстропротекающие процессы, сопровождаемые генерированием механических и электромагнитных волн, ко-

торые приводят к изменению физико-механических свойств, деформации и перестройки молекулярно-электронных и кристаллических структур, образуется избыток энергии возбуждения, сконцентрированной, в основном, на границе гетерогенных фаз. Поглощенная металлами энергия быстро, за времена порядка нескольких фемтосекунд распределяется между

электронами и затем медленно преобразуется в энергию колебаний решетки. Распределение температуры $T(x, t)$ по глубине мишени рассчитывается по уравнению теплопроводности с объемным выделением энергии лазерного импульса:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} - u(t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + (1 - R) \alpha I_0 \exp(-\alpha x),$$

где c_p — теплоемкость, ρ — массовая плотность материала мишени, λ — теплопроводность, $u(t)$ — скорость движения поверхности вследствие испарения.

У диэлектриков с большой энергетической щелью в начале лазерного воздействия отсутствует поглощение излучения за счет обратного тормозного рассеяния. Таким образом, большинство диэлектриков при относительно умеренных интенсивностях лазерного излучения можно считать прозрачными. При достижении пороговой интенсивности, зависящей от свойств конкретного материала, начинается нарушение структуры диэлектрика, выражающееся в изменении коэффициентов отражения и поглощения с последующим плавлением поверхности [3, 4].

Для описания динамики нагрева диэлектрика используют следующую формулу уравнения теплопроводности с учетом всех каналов баланса лазерной энергии в облучаемом образце:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{J}{en_e} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \Sigma(x, t).$$

где J — ток электронов, λ — теплопроводность, e — заряд электрона, n_e — концентрация электронов, $\Sigma(x, t)$ — описывает поглощение излучения в образце, выбирается таким образом, чтобы учесть все возможные каналы поглощения лазерной энергии.

Совместное решение уравнений теплопроводности для компонентов, входящих в состав дисперсных сред, позволяет определить оптимальные условия для варьирования размерами частиц золота, образующихся при лазерном воздействии на минеральные ультрадисперсные среды. Изучение направленного изменения свойств дисперсных золотосодержащих минераль-

ных объектов при лазерном воздействии методами электронной, атомно-силовой микроскопии, показало, что по мере увеличения мощности энергетического лазерного воздействия образуются поверхностно неоднородные минеральные структуры. Золото на поверхности алюмосиликатных спеков находится в виде самоорганизующихся сфероподобных структур, что позволило найти технические решения в виде патента на изобретение [5].

Процесс агломерации ультрадисперсного и коллоидно-ионного золота из минеральных ассоциаций и техногенных продуктов под действием лазерного излучения, сопровождаемый образованием сферических гранул, позволит использовать обычные гравитационные методы для извлечения золота. На основе обнаруженного эффекта могут быть предложены эффективные и экологически чистые методы для предварительной концентрации благородных металлов и с последующим извлечением их традиционными средствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России. // Горный журнал, 2005, № 12. С. 56—64.

2. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Технологические лазеры и лазерное излучение. // СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. — 52 с.

3. Булгаков Л.В. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество/ Булгаков Л.В., Булгакова Н.М., Бураков И.М. и др. // Новосибирск: институт теплофизики СО РАН, 2009, 462 с.

4. Леоненко Н.А. Воздействие лазерного излучения на золотосодержащие дисперсные среды и моделирование температурного поля процесса лазерной агломерации/

Леоненко Н.А., Ванина Е.А., Гальцов А.А., Капустина Г.Г., Швец Н.Л. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, № 5-2. — Орел: Изд-во Орел ГТУ, — 2010. — с. 83-91.

5. Пат. 2413779 Российская Федерация, МПК С 22 В 11/02, В 22 F 1/00. Способ извлечения дисперсного золота из золотосодержащего высокоглинистого минерального сырья / Леоненко Н.А., Кузьменко А.П., Силютин И.В., Рассказов И.Ю., Секисов Г.В., Гурман М.А., Капустина Г.Г., Швец Н.Л.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела ДВО РАН, Тихоокеанский государственный университет. — № 2010113683/02; заявл. 07.04.10; опубл. 10.03.11. Бюл. № 7. 

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Капустина Г.Г. — аспирант ИГД ДВО РАН, старший преподаватель кафедры «Физика», Тихоокеанского государственного университета, e-mail: g.kapustina@mail.ru.