

## **МЕХАНИЗМЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ СРЕДЫ**

Г.Г. Капустина<sup>1</sup>, Н.А. Леоненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»  
680035, Россия, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136  
g.kapustina@mail.ru

<sup>2</sup>Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук –  
обособленное структурное подразделение ФГБУН «Хабаровский Федеральный  
исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук»  
680000, Россия, Хабаровск, ул. Тургенева, 51  
leonenko@igd.khv.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.621

**Аннотация:** Разработка современных технологий комплексного извлечения ценных компонентов из труднообогатимых руд и техногенных месторождений возможна на базе новейших достижений фундаментальных наук, комбинировании физико-химических, обогатительных и металлургических процессов. В работе описаны результаты по воздействию лазерного излучения на минеральные образцы с ультрадисперсным «неизвлекаемым» золотом из иловых прудов-отстойников россыпных месторождений Дальнего Востока. Объектом исследований является воздействие источника непрерывного лазерного излучения на образцы минералов, объектов аллювиальных отложений, содержащих субметрические и наноразмерные формы золота, не извлекаемые традиционными гравитационными методами. Цель работы заключалась в исследовании процессов взаимодействия лазерного излучения с дисперсными минеральными средами, содержащими ультрадисперсное золото, и определение условий агломерации ультрадисперсного золота. Электронно-микроскопические изображения образцов получены с помощью микроскопа «LEO EVO 40HV» (Carl Zeiss, Германия), оснащённом энергодисперсионным анализатором «INCA-ENERGY». Предложена модель, описывающая процессы на границе гетерогенных фаз. Анализ обнаруженного эффекта агломерирования золота позволил сформулировать технические решения, которые были отражены в патентах на изобретения.

*Ключевые слова:* лазерно-индуцированный, ультрадисперсный, коллоидно-ионное, золото, золотосодержащие минеральные продукты, структурное упорядочение, сканирующая электронная микроскопия.

### **1. Введение**

Уникальность физико-химических свойств золота, серебра, платины и других благородных металлов всегда находилась в области пристального интереса исследователей. Интерес к этим металлам имеет устойчивую тенденцию роста, что в значительной мере обусловлен на всех этапах от добычи и до практического применения. На последнем уровне, в связи с развитием нанотехнологий, открылись новые горизонты применения, использования способов извлечения наноразмерных благородных металлов.

В последние годы всё в большей степени в разработку вовлекаются

месторождения вкрапленных и тонко вкрапленных руд, в которых преобладают невидимые глазом мелкие частицы благородных металлов. Наличие мелких, ультрамелких выделений благородных металлов, а также тонкие взаимные прорастания с парагенными минералами значительно увеличивают технологические потери при их извлечении. Примерами таких золотосеребряных месторождений являются Майское и Кумирное в Приморье, Многовершинное, Белая Гора, Дурминское и Хаканджинское в Хабаровском крае, Покровское в Амурской области, Карамкенское и Дукатское в Магаданской области и многие другие. В процессе переработки руд значительная часть микровыделений самородного золота остаётся в различных минералах, уходящих в отходы золотодобычи, и особенно большие потери золота отмечаются при плавке получаемых золотосодержащих концентратов, где значительная часть золота переходит в шлак.

Разработка современных технологий комплексного извлечения ценных компонентов из труднообогатимых руд и техногенных месторождений возможна на базе достижений фундаментальных наук, комбинировании физико-химических, обогатительных и металлургических процессов.

Эффективными способами повышения извлечения ценных металлов из минералов является использование концентрированных потоков энергии, акустических и переменных электромагнитных полей. Известно, что при воздействии пучка ускоренных электронов на поверхность минерала происходит ионизация, приводящая к смещению атомов в кристаллической решетке минерала и образованию вакансий. То есть происходит деформация, перестройка молекулярно-электронных и кристаллических структур, и как следствие этого образуется избыток энергии возбуждения на границе раздела фаз. Предварительное облучение потоком ускоренных электронов золотосодержащих минералов, улучшает результаты цианирования, повышая извлечение золота на 6-25 % [1].

Под воздействием акустического поля в жидкой среде происходит кавитация. Кавитационные эффекты ускоряют процессы диспергирования и дезинтеграции минералов, что способствует извлечению мелкого золота [2]. При сверхвысокочастотной обработке (СВЧ) происходит неоднородное нагревание горной породы. При нагревании минералов возникают термомеханические напряжения, что приводит к микрорастрескиванию породы [3]. Проведенные исследования по воздействию СВЧ-поля на минеральные среды показали, что время измельчения породы сокращается на 20-25 %, повышается извлечение золота при цианировании арсенопиритных концентратов и выщелачивании сульфидно-кварцевых руд.

С помощью электроимпульсного воздействия можно увеличивать или уменьшать число генерируемых трещин, раскрывать зерна отдельных минералов, изменять прочностные свойства материала, удельную поверхность, увеличивать реакционную способность в химических реакциях. Но при обработке тонкодисперсных материалов эффективность электроимпульсного разрушения резко падает. При уменьшении размера частиц до 1-2 мкм применение электрического пробоя внутри частицы невозможно [3, 4]. В работах В.А. Чантурия, И.Ж. Бунина, А.Т. Ковалева разбираются механизмы дезинтеграции минеральных частиц при воздействии наносекундных мощных электромагнитных импульсов (МЭМИ), состоящие в том, что за счет электрического пробоя минералов, локального импульсного нагрева и нетеплового поглощения электромагнитной энергии происходит вскрытие микро- и наночастиц благородных металлов [5]. При воздействии МЭМИ на сульфиды и кварциты, содержащие включения золота, приводит к локальному разрушению минеральной матрицы вблизи неоднородностей, создается система микротрещин, которые способствуют прохождению высоковольтного разряда через микрочастицы. Это способствует не только вскрытию микрочастиц, но и их отделению от вмещающего материала. Использование электромагнитных импульсных воздействий на золотосодержащие руды позволяет увеличить извлечение золота на 30-80 % [6-8]. Метод МЭМИ позволяет наиболее рационально использовать электроэнергию, достигая наибольшей полноты.

Цель работы заключалась в исследовании процессов взаимодействия лазерного излучения с дисперсными минеральными средами, содержащими ультрадисперсное золото, и определение условий агломерации ультрадисперсного золота.

## **2. Методика эксперимента**

В работе описаны результаты по воздействию лазерного излучения на минеральные образцы с ультрадисперсным «неизвлекаемым» золотом из иловых прудов-отстойников россыпных месторождений Дальнего Востока.

Минералогический состав исходной тяжелой фракции из илового пруда-отстойника содержал следующие минералы: ильменит, сфен, гранат, пирит, циркон, рутил, дисперсное золото. Тяжёлая фракция минералов выделена по минералогической методике разделения минералов в тяжелой жидкости. В качестве тяжёлой жидкости использовался бромформ, с помощью которого все минералы, имеющие плотность более 2,8 г/см<sup>3</sup> переходили в тяжёлую фракцию.

Для лазерной обработки использовали иттербиевым волоконный

лазер ЛС–06. Образцы располагали на графитовой подложке. Движение подложки осуществлялось со скоростью 1 мм/с. Диаметр пятна фокусировки лазерного излучения составил от 5 до 7 мм. Диапазон варьирования мощности лазерного излучения изменялся от 60 до 270 Вт.

Электронно-микроскопические изображения образцов получены с помощью микроскопа «LEO EVO 40HV» (Carl Zeiss, Германия), оснащённом энергодисперсионным анализатором «INCA-ENERGY». Чувствительность метода составляет ~0,1%. Ширина электронного пучка от 20 до 30 нм. Глубина проникновения электронного пучка примерно 1 мкм.

### 3. Результаты исследования

По данным микроскопического анализа в результате взаимодействия лазерного излучения с тяжёлой фракцией минералов зарегистрировано образование обожженных темных сфер. Диаметр таких сфер варьировался в пределах от 500 до 3000 мкм. Визуально зарегистрировано образование на этих поверхностях частиц расплавленного золота каплевидной, сферической формы с размером от 50 до 500 мкм и более. Это иллюстрируется серией растровых изображений агломерированных минеральных фаз после лазерной обработки, представленных в соответствии с рис. 1-5. Отметим, что в представленной серии изображений продуктов лазерной обработки, демонстрируются процессы структурных формообразований из агломерированного наномасштабного золота, представляющего светлые сферы. Показательно, что поверхностная структура таких образований также весьма сложна. Наличие каналов с размерами около 1 мкм (см. рис. 1 в) может свидетельствовать о действии в процессе лазерного переплава известного термокапиллярного механизма, на который, очевидно, накладываются гидродинамические явления, происходящие с разными скоростями для различных расплавов металлов.

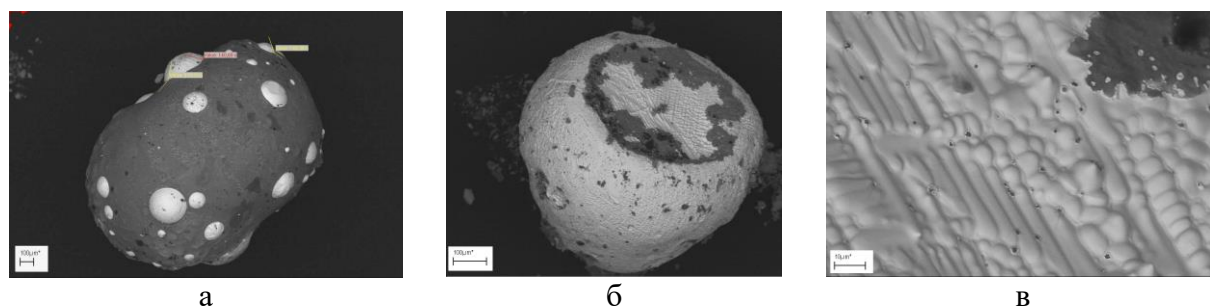


Рис. 1. Растровые изображения агломерированных минеральных фаз после взаимодействия с лазерным излучением: а – агломерат тяжелого концентрата с золотом (40<sup>x</sup>), масштабная метка - 100 мкм; б – сферическое золото (194<sup>x</sup>), масштабная метка – 100 мкм; в – поверхность сферического золота (1210<sup>x</sup>), масштабная метка – 10 мкм.

На рис. 3-5 представлены растровые изображения продуктов,

подвергнутых лазерной обработке, и данные энергодисперсионного спектрального анализа в выделенных областях на поверхности.

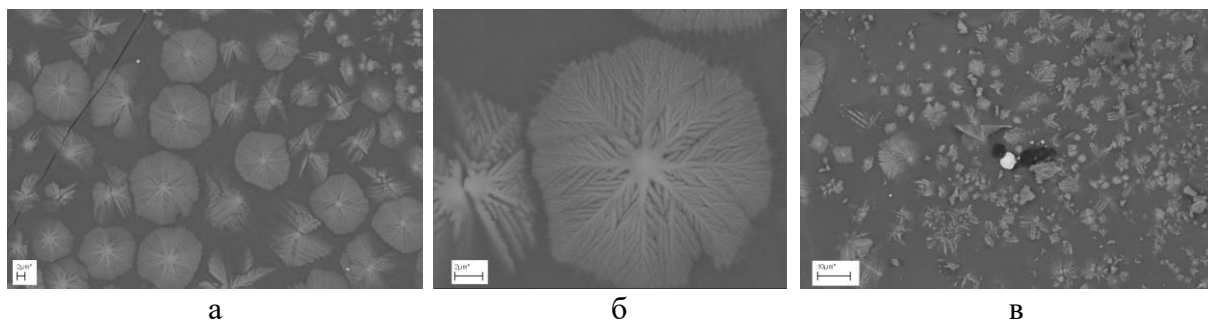


Рис. 2. Растровые изображения фрактальных структур при разных увеличениях: а –  $\times 1110$ , масштабная метка – 2 мкм; б –  $\times 3380$ ; в –  $\times 900$ , масштабная метка – 10 мкм.

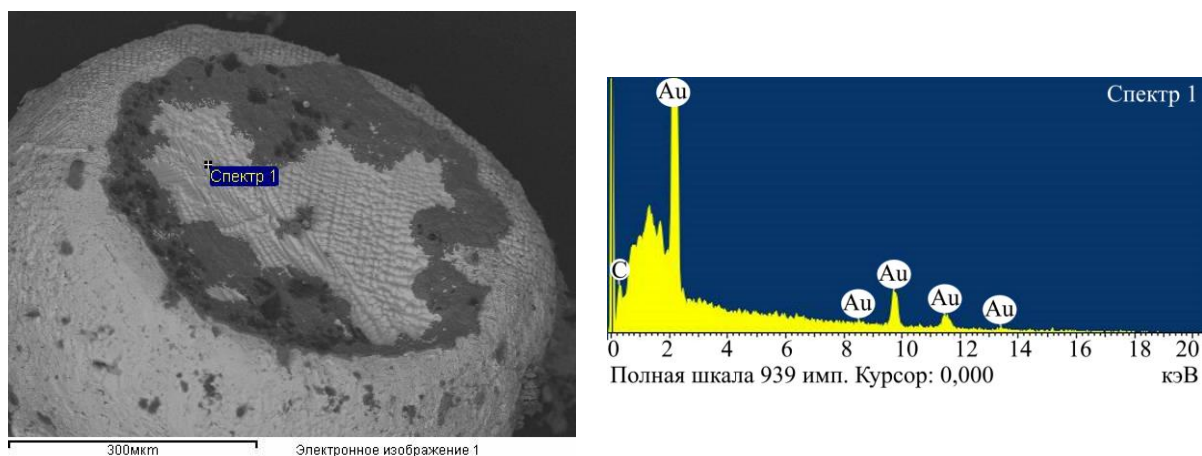


Рис. 3. СЭМ-изображение и спектр агломерата золота в локальной области  $Au_{C_{15}}$ , масштабная метка 300 мкм.

Для золота процесс воздействия лазерного излучения на минералогические золотосодержащие образцы приводит к формированию сферообразных поверхностей золота, либо полых, либо каплевидных, представленных в соответствии с рисунками. При лазерном воздействии на многокомпонентный минералогический объект, амальгамированное золото агломерируется. После плавления ртуть на «золотых сферах» не обнаруживается, что доказано и подтверждено с помощью локального рентгеноспектрального микроанализа

#### 4. Обсуждение полученных результатов

Под действием лазерного излучения в минеральных средах имеют место быстропротекающие процессы, параллельно проходящие с генерированием механических и электромагнитных волн, из-за которых изменяются физико-механические свойства, деформации и перестройки молекулярно-электронных и кристаллических структур, образуется

избыток энергии возбуждения, сконцентрированной, в основном, на границе гетерогенных фаз.

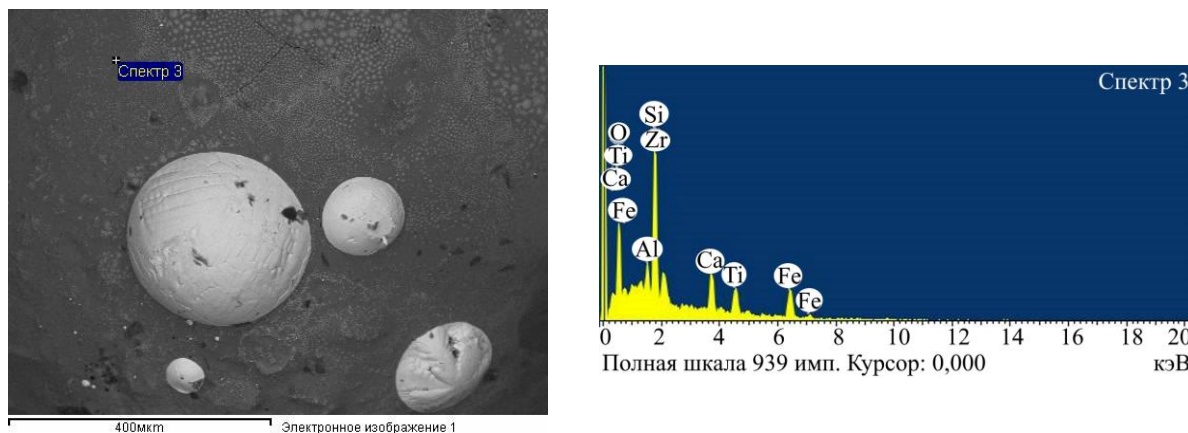


Рис. 4. СЭМ-изображение и спектр в локальной области темного агломерата, расчетное соединение в локальной области спектра  $Fe_5Ti_5Zr_3Al_9Si_9Ca_6O_2$ , масштабная метка 400 мкм.

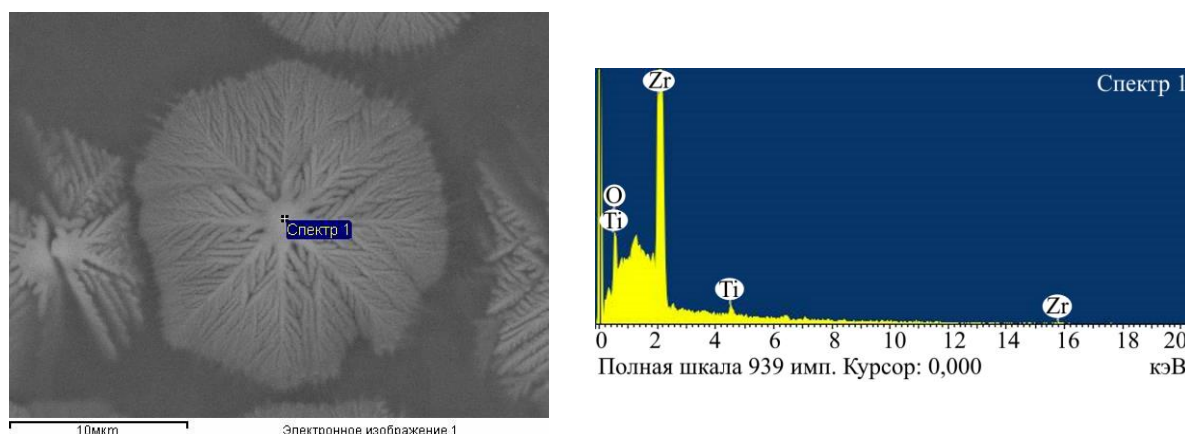


Рис. 5. СЭМ-изображение и спектр центральной части фрактальной структуры  $Ti_2ZrO_{0,5}$ , масштабная метка 10 мкм.

Поглощенная металлами энергия быстро, за времена порядка нескольких фемтосекунд, распределяется между электронами, далее медленно преобразуется силой электрон-фононного взаимодействия и может занимать время от долей пикосекунды до нескольких десятков пикосекунд. Распределение температуры  $T(x,t)$  по глубине мишени можно рассчитать из решения уравнения теплопроводности с учетом объемного выделения энергии во время лазерного импульса [9]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho c} q(x,t), \quad (1)$$

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} - u(t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + (1-R) \alpha I_0 \exp(-\alpha x), \quad (2)$$

где  $c_p$  – теплоемкость,  $\rho$  – массовая плотность материала мишени,

$\lambda$  – теплопроводность,  $R$  – коэффициент отражения поверхности мишени,  $u(t)$  – скорость движения поверхности вследствие испарения.

Совместное решение уравнений теплопроводности для компонентов, которые входят в состав дисперсных сред, позволяет определить оптимальные условия для варьирования размеров частиц золота, которые образуются при лазерном воздействии на минеральные ультрадисперсные среды. Изучение направленного изменения свойств природных дисперсных золотосодержащих минеральных объектов при воздействии лазерного излучения методом электронной продемонстрировало, что по мере увеличения мощности энергетического лазерного воздействия появляются поверхностные неоднородные структуры. Поверхность алюмосиликатных спеков образует фрактальные структуры из таких элементов как железо, циркон, титан, алюминий, кремний, кальций, кислород.

При построения качественной физической модели процессов, протекающих при лазерном воздействии на минеральную матрицу, содержащую наномасштабные и субмикронные частицы золота, необходимо учитывать не только термодинамические и физико-химические характеристики, такие как температуру и теплоту фазовых переходов всех компонентов, коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  и углы смачивания жидкого золота  $\theta$ , термохимические данные многостадийных гетерогенных химических реакций, но также высокие скорости и неравновесность протекающих процессов. Под воздействием внешних потоков энергии большой мощности минеральная матрица с частицами золота становится открытой конденсированной неравновесной системой, описание основных закономерностей поведения которой возможно с использованием принципов синергетики. Синергетическое описание процессов структурного изменения с самоорганизацией различных подструктур в таких сильнонеравновесных конденсированных системах связано с тем, что структурные неустойчивости начинают нарастать при критических значениях внешних параметров. При этом возникновение локальной упорядоченности в изначально неупорядоченной конденсированной системе является основным признаком самоорганизации. В качестве таких локально упорядоченных структур можно рассматривать возникающие на поверхности минеральной матрицы при лазерном воздействии не только дендриты минералов, но и агломераты золота. Как показал эксперимент, структура большинства этих упорядоченных образований является мультифрактальной, и они описываются как случайные фракталы. Оценка фрактальной размерности профиля таких фрактальных образований дает значения порядка от 1,7 до 1,9, что по порядку величины совпадает данными, полученными для

профилей наноструктур золота [10]. Более того, и процесс перколяции, заключающийся в вытеснении расплавленного золота по капиллярам пористой матрицы на поверхность, также описывается с помощью случайных фракталов при учете их масштабной инвариантности или скейлинга.

Согласно правилу Этвёша коэффициент поверхностного натяжения линейно уменьшается с ростом температуры. Коэффициент поверхностного натяжения и температура плавления у золота имеют значения  $\sigma = 1125$  мН/м,  $T_m = 1063^\circ\text{C}$  [11]. При плавлении должны формироваться сферические поверхности с наименьшей суммарной площадью, что соответствует минимальной поверхностной энергии  $E = \sigma S$ . На начальной стадии лазерного оплавления минеральных продуктов, очевидно, происходит процесс формообразования из расплавов поверхностей материалов с минимальной энергией. Частицы ультрадисперсного золота, подобно броуновским частицам, совершают хаотические движения по поверхности сферы, состоящих из легкоплавких компонентов, вплоть до момента их плавления. Плавление ультрадисперсных и наномасштабных частиц золота происходит при температурах существенно ниже  $1000^\circ\text{C}$  [12]. Одновременно идет процесс перколяции – выход расплавленного золота по капиллярам из объема пористой матрицы на облучаемую поверхность, что объясняется не только низкой смачиваемостью жидким золотом стенок капилляров минеральной матрицы, но и возникающими при лазерном воздействии значительными величинами градиентов термодинамических параметров – температуры, давления, концентраций и пр. Далее, за счет коалесценции происходит агломерация поверхностных мицеллоподобных расплавленных ультрадисперсных частиц золота, поэтому в процессе лазерного воздействия сферообразные частицы золота укрупняются, скорость их движения снижается. На последней стадии агломерации поступательное движение частиц почти прекращается, и происходит только их укрупнение. Такое сферическое формообразование золота при лазерном воздействии объясняется коалесценцией [13] и действием сил поверхностного натяжения.

## **5. Заключение**

Таким образом, показано, что воздействие лазерного излучения на минеральные золотосодержащие ассоциации способствует изменению их гранулометрического состава. Данный способ может служить основой для разработки экологически чистых технологий предварительной агломерации субметрических и нанометрических форм благородных металлов с последующим извлечением традиционными способами.



Обнаруженный эффект агломерирования золота позволил найти технические решения в виде патентов на изобретения [14, 15].

*Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.*

### **Библиографический список:**

1. **Бунин, И.Ж.** Изменение морфологии поверхности, микротвердости и физико-химических свойств природных минералов при воздействии диэлектрического барьерного разряда / И.Ж. Бунин, В.А. Чантурия, М.В. Рязанцева и др. // Известия российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – № 9. – С. 1355-1358. DOI: 10.31857/S0367676520090094.
2. **Бахарев, С.А.** Акустическая технология дополнительного извлечения металла, в том числе из песков техногенных россыпных месторождений / С.А. Бахарев // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ. – 2005. – № 9. – С. 333-338.
3. **Курец, В.И.** Электроимпульсная дезинтеграция материалов / В.И. Курец, А.Ф. Усов, В.А. Цукерман. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с.
4. **Петров, В.М.** Новые применения радиоэлектроники: Разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ / В.М. Петров // «ИНФОРМОСТ» – «Радиоэлектроника и Телекоммуникации». – 2002. – № 3 (21). – С. 49-55.
5. **Усов, А.Ф.** Научно-инновационный потенциал электроимпульсного способа дезинтеграции для переработки минерального сырья / А.Ф. Усов, В.А. Цукерман // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ. – 2007. – № 8. – С. 243-248.
6. **Чантурия, В.А.** Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья / В.А. Чантурия, В.Е. Вигдергауз // Горный журнал. – 2008. – № 6. – С. 71-74.
7. **Чантурия, В.А.** Модели процессов дезинтеграции и вскрытия минеральных сред при высокоимпульсных (pulsed power) воздействиях / В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, А.Т. Ковалев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 9. – С. 326-332.
8. **Чантурия, В.А.** О механизмах диссипации энергии мощных наносекундных импульсов в природных минералах-полупроводниках (магнитный пинч-эффект) / В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, А.Т. Ковалев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 9. – С. 367-375.
9. **Булгаков, Л.В.** Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество / Л.В. Булгаков, Н.М. Булгакова, И.М. Бураков и др. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. – 462 с.
10. **Антонов, А.С.** Исследование фрактальных свойств наноразмерных пленок золота, серебра и меди: атомно-силовая и туннельная микроскопия / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов и др. // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 473-486.
11. Физические величины. Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергия. 1991. – 1232 с.
12. **Самсонов, В.М.** Комплексный подход к компьютерному моделированию плавления и кристаллизации нанокластеров золота / В.М. Самсонов, Н.Ю. Сдобняков, А.Г. Бембель и др. // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2013. – Т. 2. – № 4. – С. 448-451. DOI: 10.1134/S2304487X13040160.
13. **Колосов, А.Ю.** Моделирование процесса коалесценции наночастиц золота методом Монте-Карло / А.Ю. Колосов, Н.Ю. Сдобняков, П.В. Комаров и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2012. – Вып. 4. – С. 129-142.
14. **Пат. 2255995 Российская Федерация, МПК C22B11/00, 1/00** Способ лазерного формообразования и обогащения благородными металлами минеральных ассоциаций / Шевкун Е.Б., Кузьменко А.П., Леоненко Н.А., Ятлукова Н.Г., Кузьменко Н.А.; заявитель и патентообладатель Государственное учреждение Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук и Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Хабаровский государственный технический университет. – № 2003135458/02; заявл. 04.12.03; опубл. 10.07.05,

Бюл. № 19. – 6 с.

15. Пат. 2413779 Российская Федерация, МПК С22В11/02, В22F1/00 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 Государственное учреждение Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Тихоокеанский государственный университет. – № 2010113683/02; заявл. 07.04.2010; опубл. 10.03.11, Бюл № 7. – 8 с.

#### References:

1. Bunin I.Z., Chanturiya V.A., Ryazantseva M.V. et al. Changes in the surface morphology, microhardness, and physicochemical properties of natural minerals under the influence of a dielectric barrier discharge, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, issue 9, pp. 1161-1164. DOI: 10.3103/S1062873820090099.
2. Bakharev S.A. Akusticheskaya tekhnologiya dopolnitel'nogo izvlecheniya metalla, v tom chisle iz peskov tekhnogennykh rossypanykh mestorozhdenij [Acoustic technology for additional extraction of metal, including from the sands of technogenic alluvial deposits], *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]*, 2005, no. 9, pp. 333-338. (In Russian).
3. Kurets V.I., Usov A.F., Tsukerman V.A. *Elektroimpul'snaya dezintegratsiya materialov* [Electropulse disintegration of materials]. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2002, 324 p. (In Russian).
4. Petrov V.M. Novye primeneniya radioelektroniki: Razuprochnenie gornykh porod moshchnym elektromagnitnym polem SVCh [New applications of radio electronics: Rock softening by a powerful microwave electromagnetic field], «*INFORMOST*» – «*Radioelektronika i Telekommunikatsii*» [«*INFORMOST*» – «*Radioelectronics and Telecommunications*»], 2002, no. 3 (21), pp. 49-55. (In Russian).
5. Usov A.F., Tsukerman V.A. Nauchno-innovatsionnyj potentsial elektroimpul'snogo sposoba dezintegratsii dlya pererabotki mineral'nogo syr'ya [Scientific and innovative potential of the electropulse method of disintegration for the processing of mineral raw materials], *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]*, 2007, no. 8, pp. 243-248. (In Russian).
6. Chanturiya V.A., Vigdergauz V.E. Innovatsionnye tekhnologii pererabotki tekhnogennogo mineral'nogo syr' [Innovative technologies for processing of man-caused mineral raw materials], *Gornyj zhurnal [Mining Journal]*, 2008, no. 6, pp. 71-74. (In Russian).
7. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Kovalev A.T. Modeli protsessov dezintegratsii i vskrytiya mineral'nykh sred pri vysokoimpul'snykh (pulsed power) vozdeystviyakh [Models of processes of disintegration and opening of mineral environments under high-pulse (pulsed power) impacts], *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]*, 2005, no. 9, pp. 326-332. (In Russian).
8. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Kovalev A.T. O mekhanizmaxh dissipatsii energii moshchnykh nanosekundnykh impul'sov v prirodnykh mineralakh-poluprovodnikakh (magnitnyj pinch-effekt) [On the mechanisms of energy dissipation of high-power nanosecond pulses in natural semiconductor minerals (magnetic pinch effect)], *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]*, 2006, no. 9, pp. 367-375. (In Russian).
9. Bulgakov L. V., Bulgakova N.M., Burakov I.M. et al. *Sintez nanorazmernykh materialov pri vozdeystvii moshchnykh potokov energii na veshchestvo* [Synthesis of nanoscale materials under the influence of powerful energy flows on matter]. Novosibirsk, Institute of Thermal Physics SB RAS Publ., 2009, 462 p. (in Russian).
10. Antonov A.S., Sdobnyakov N.Yu., Ivanov D.V. et al. Issledovanie fraktal'nykh svoystv nanorazmernykh plenok zolota, srebra i medi: atomno-silovaya i tunnel'naya mikroskopiya [Investigation of fractal properties of nanosized gold, silver and copper films: atomic force and tunnelling microscopy ], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy]*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 473-486. (In Russian).
11. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Handbook], ed. by I.S. Grigor'eva, E.Z. Mejlikhova, Moscow, Energiya Publ., 1991, 1232 p. (In Russian).
12. Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Yu., Bembel A.G. et al. Kompleksnyj podkhod k komp'yuternomu modelirovaniyu plavleniya i kristallizatsii nanoklasterov zolota [Complex approach to the computer simulation of the melting and crystallization of gold nanoclusters], *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 448-451. DOI: 10.1134/S2304487X13040160. (In Russian).
13. Kolosov A.Yu., Sdobnyakov N.Yu., Komarov P.V. et al. Modelirovanie protsessa koalescentsii nanochastits zolota metodom Monte-Karlo [Simulation of the coalescence process of gold nanoparticles by Monte-Carlo method], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and*

*chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*], 2012, issue 4, pp. 129-142. (In Russian).

14. Shevkun E.B., Kuzmenko A.P., Leonenko N.A., Yatlukova N.G., Kuzmenko N.A. *Sposob lazernogo formoobrazovaniya i obogashcheniya blagorodnymi metallami mineral'nykh assotsiatsij* [Method for laser shaping and enrichment of mineral associations with noble metals]. Patent RF, no. 2255995, 2003. (In Russian).

15. Leonenko N.A., Kuzmenko A.P., Silyutin I.V., Rasskazov I.Yu., Sekisov G.V., Gurman M.A., Kapustina G.G., Shvec N.L. *Sposob izvlecheniya dispersnogo zolota iz zolotosoderzhashchego vysokoglinistogo mineral'nogo syr'ya* [Method for extracting dispersed gold from gold-bearing high-clay mineral raw materials]. Patent RF, no. 2413779, 2011. (In Russian).

*Original paper*

## **MECHANISMS OF LASER IMPACT ON ULTRA-FINE MINERAL MEDIUM**

G.G. Kapustin<sup>1</sup>, N.A. Leonenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Pacific State University, Khabarovsk, Russia*

<sup>2</sup>*Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences – A separate subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.621

**Abstract:** The development of modern technologies for the complex extraction of valuable components from refractory ores and technogenic deposits is possible on the basis of the latest achievements of fundamental sciences, a combination of physicochemical, enrichment and metallurgical processes. The paper describes the results on the impact of laser radiation on mineral samples with ultrafine «non-recoverable» gold from silt ponds-settlers of alluvial deposits in the Far East. The object of research is the impact of a source of continuous laser radiation on samples of minerals, objects of alluvial deposits containing submetric and nanosized forms of gold that are not recoverable by traditional gravity methods. The purpose of this work was to study the processes of interaction of laser radiation with dispersed mineral media containing ultrafine gold and to determine the conditions for agglomeration of ultrafine gold. Electron microscopic images of the samples were obtained using a LEO EVO 40HV microscope (Carl Zeiss, Germany) equipped with an INCA-ENERGY energy-dispersive analyzer. A model is proposed that describes the processes at the boundary of heterogeneous phases. An analysis of the discovered effect of gold agglomeration made it possible to formulate technical solutions that were reflected in patents for inventions. The discovered effect of gold agglomeration made it possible to find technical solutions in the form of patents for inventions.

**Keywords:** *laser-induced, ultrafine, colloid-ion, gold, gold-bearing mineral products, structural ordering, scanning electron microscopy.*

*Капустина Галина Григорьевна – старший преподаватель, кафедры физики, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»*

*Леоненко Нина Александровна – к.т.н., ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук»*

*Galina G. Kapustina – Senior Lecturer, Physics Department, Pacific State University*

*Nina A. Leonenko – Ph. D., Leading Researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences – A separate subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*

Поступила в редакцию/received: 15.08.2022; после рецензирования/revision: 17.09.2022; принята/accepted 20.09.2022.