

УДК 622.7.016.3:535.2

Н.А. Леоненко

ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ МИНЕРАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

Обосновано практическое применение лазерного излучения для решения геотехнологических задач в процессе освоения месторождений.

Ключевые слова: лазерное излучение, дефрагментация, агломерация, минеральное сырье, техногенные продукты.

Успешное развитие горнодобывающей промышленности невозможно без опоры на результаты фундаментальных и прикладных исследований. Такие исследования в первую очередь определяют внедрение высоких технологий с целью повышения как качества и интенсификации добычи полезных ископаемых, так и решения экологических задач, а также практическими потребностями создания принципиально новых технологий. Актуальными становятся задачи, связанные с воздействием мощных потоков энергии на вещество с целью исследований поведения веществ в экстремальных условиях и разработки новых технологических решений в промышленности.

Мировая тенденция такова, что научные достижения в области исследования взаимодействия энергетических потоков с веществом ведут к появлению новых технических средств, к решению прикладных задач, а в конечном итоге — инновационных технологических решений. Особенно такую тенденцию можно проследить в исследованиях квантовой электроники и лазерной техники. Трудно назвать область человеческой деятельности, где бы ни применялись разнообразные «лазерные приложения». За полувековой путь от создания лазера

до практического внедрения готовых технологий ключевым моментом было и остается взаимодействие лазерного излучения с веществом, которое привело к тому, что имеется множество направлений и оттенков лазерных технологий. Рынок лазерной обработки материалов является самым мощным, наиболее мобильным и быстро развивающимся [1, 2].

Лазерное излучение обладает многими специфическими свойствами, которые в комплексе и открыли совершенно новые возможности и области приложений оптики — это высочайшая спектральная и пространственная плотность энергии; высокая когерентность излучения, которая проявляется в его предельной направленности и высокой монохроматичности.

Результаты комплексных исследований по использованию лазерного излучения в горном деле, включающие пространственно-временные управляемые процессы разрушения горных пород; дефрагментацию благороднометалльного минерального сырья и агломерацию субмикронных и нанометрических форм золота из техногенных продуктов лазерным излучением представлены в данной работе.

Лазерная оптоволоконная система инициирования зарядов разработана на основе запатентованного устрой-

ства управления передачей поляризованного лазерного излучения к оптическим детонаторам с также запатентованным энергонасыщенным светочувствительным составом [3—5]. Известно, что при разрушении горных пород применяют, как правило, короткозамедленный режим взрывания. В этом случае, обычные детонаторы с пиротехническим элементом замедления обладают разбросом, величина которого составляет порядка 10 мс и понижается до уровня порядка 1 мс в детонаторах с электронным замедлением. Недостатки влияния паразитарных токов при электро-взрывном способе можно устранить применением оптических методов инициирования, которые за счет фотогальванической развязки создают дополнительные возможности оптимизации параметров дробления пород путем формирования в горном массиве полей напряжений рациональной конфигурации, в том числе, в режиме бегущей ударной волны.

В предлагаемой технологии [3-5] энергия инициирующего лазерного импульса в заданной пространственно-временной последовательности с высокой точностью передается по волоконно-оптическому кабелю к специально разработанному оптическому детонатору на основе энергоемкого состава [4]. Нами экспериментально установлен ряд горючих компонентов чувствительных только к лазерному излучению, определены параметры лазерного излучения, обеспечивающие переход горения в детонацию. Выявлен смесевой состав на основе несимметричного производного гидразина с окислителем, в котором под действием лазерного излучения возникает быстропротекающий процесс, приводящий к генерации ударных волн. Состав можно использовать в оптических детонаторах, которые

нельзя задействовать несанкционированно, что позволит исключить хищение средств инициирования (СИ) с мест производства взрывных работ, обеспечит безопасность транспортировки СИ. Установленные рациональные параметры воздействия лазерного излучения на энергоемкие составы являются исходными данными конструкторской проработки полевого лазера. Особенностью такой системы является не восприимчивость к паразитарным электромагнитным воздействиям. Система обладает повышенной безопасностью. Управление передачей лазерного излучения к специально разработанному устройству с энергонасыщенным составом осуществляется магнитооптическим пространственно-временным модулятором [5], что позволяет реализовать режим короткозамедленного взрывания скважин, без применения пиротехнических замедлителей.

Управление электромагнитными сигналами осуществляется на основе магнитооптического эффекта Фарадея. Пространственно-временные модуляторы для этих целей могут изготавливаться из слабоферромагнитных материалов, которые обладают как аномально высокой магнитооптической добротностью, так и рекордно высокими, наибольшими из известных в настоящее время, скоростями перемагничивания, обусловленными движением доменных границ, вплоть до 20 000 м/с. Для управления подачей излучения на оптический детонатор используется тонкая прозрачная пластинка магнетика (толщиной $d \sim 100$ мкм) со слабоферромагнитным упорядочением, к примеру, типа ортоферрита иттрия, помещаемая на пути поляризованного электромагнитного излучения (интенсивностью I_0), что поворачивает плоскость поляризации (θ_0) на фарадеевский угол $\theta_F =$

$\theta_0 + \Delta\theta$. Изменения интенсивности за анализатором описываются выражением: $I = I_0 \exp(-\alpha d) \cos^2(\beta \pm \theta_F)$, где: α — коэффициент оптического поглощения магнетика. Задавая угол β для углов между анализатором и поляризатором могут быть реализованы модуляционный или ключевой режимы: $(\beta \pm \theta_0) = 45^\circ$ и $(\beta \pm \theta_0) = 0$, соответственно. Так как при угле $(\beta \pm \theta_0) = 45^\circ$ значение дифференциала достигает максимума — $dI/d\theta_F = I_0 \exp(-\alpha d) \sin^2(\beta \pm \theta_0)$, то наибольшее изменение интенсивности света, достигаемое в режиме модуляции, составляет:

$$\Delta I/\Delta\theta = I_0 \exp(-\alpha d) \sin^2(\beta \pm \theta_F).$$

В ключевом режиме это выражение преобразуется: $\Delta I/\Delta\theta = I_0 \exp(-\alpha d) \sin^2(\beta \pm \theta_F)$.

Оптимальная толщина пластинки $d_{\text{опт}}$ и эффективность $\eta_{\text{опт}}$ такого магнитооптического модулятора, определяются: $d_{\text{опт}} = (2\theta_F)^{-1} \arctg(2\theta_F/\alpha)$,

$$\eta_{\text{опт}} = \exp[-(\Psi)^{-1} \arctg\theta_F] \sin^2(\arctg\Psi),$$

где $\Psi = 2\theta_F/\alpha$ — магнитооптическая добротность материала. Выбор в качестве материала для построения модулятора ортоферритов обусловлен тем, что именно в этих магнетиках величина Ψ является максимальной среди всех изученных материалов и составляет 14 град/дБ на длине волны 630 нм. Величина Ψ существенно возрастает при переходе в ближний ИК-диапазон, оптическая эффективность приближается к 80 % при оптимальной толщине 50 — 100 мкм. Устройство для передачи лазерных импульсов к оптическим детонаторам представлено на рис. 1 [5].

Устройство включает скважинные заряды с оптическими детонаторами 7, связанные с помощью световодов 6 с источником лазерного излучения 5 через магнитооптический пространственно-временной модулятор 1 (коммутирующее устройство), со-

стоящий из прозрачной пластины магнетика, помещенной между системой катушек Гельмгольца 2 с диаметром порядка 1 мм, включенных согласованно. В исходном состоянии эта прозрачная пластина магнетика однородно намагничена. Система катушек Гельмгольца 2 подключена через программируемый электронный ключ 3 к генератору магнитных импульсов 4. Лазерное излучение от источника лазерного излучения 5 падает на прозрачную пластину 1 магнетика, помещенную между системой катушек Гельмгольца 2. Входные торцы световодов размещены в локально-ограниченных областях системы катушек Гельмгольца 2.

При подаче в одну из катушек системы Гельмгольца управляющего импульса магнитного поля происходит локализованное в катушке перемагничивание. Лазерное излучение от источника 5 проходит сквозь прозрачную пластину магнетика 1, тогда как остальные катушки системы катушек Гельмгольца в магнитооптическом пространственно-временном модуляторе не пропускают лазерное излучение от источника лазерных импульсов, являясь в данный момент непрозрачными. Эффект модуляции падающего лазерного излучения достигается за счет высокоскоростного (вплоть до 20000 м/с для слабых ферромагнетиков) движения доменной границы в прозрачной пластине магнетика, что и приводит к изменению коэффициента пропускания магнитной среды практически от 100 % до нуля. Последовательность поступления к системе катушек Гельмгольца управляющих импульсов магнитного поля задается с помощью программируемого электронного ключа 3, который запускает генератор магнитных импульсов 4. Поступление управляющих импульсов магнитного поля в

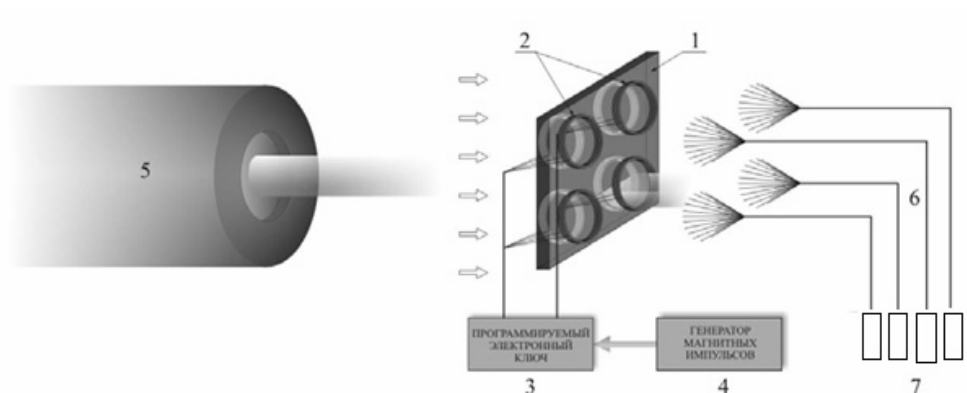


Рис. 1. Устройство управления передачей лазерных импульсов к оптическим детонаторам на основе магнитооптического пространственно-временного модулятора

Таблица

Характеристики источников лазерного излучения

Источник ЛИ	Тип лазерного источника	Частота повторения импульсов, Гц	Мощность, Вт		Энергия в импульсе, Дж	Длительность импульсов, мкс	Время лазерной обработки t, с
			Потребляемая, Вт	Излуч. Вт			
Скат 301	Импульсный, твердотельный Nd:YAG	100	2000	-	1	150 мкс — 1мс	100
Квант 15	Импульсный, твердотельный Nd:YAG	5	7000	-	8	от 1 до 10 мс	100
ЛС-06	Оптоволоконный иттербиевый непрерывный источник	-	2400	От 0 до 600	-	-	1-2

соответствующую катушку системы катушек Гельмгольца локально перемагничивает прозрачную пластинку, коэффициент пропускания становится равным 100 %, а прошедшее лазерное излучение попадает во входной торец 6 световода, размещенного в локально-ограниченной области и расположенного в непосредственной близости к одной из катушек 2. Импульс света, пройдя по оптоволокну, инициирует детонацию в заданном оптическом детонаторе. Это позволя-

ет достигнуть высокоскоростного и прецизионного управления лазерными импульсами, подаваемыми от источника лазерного излучения в оптические детонаторы в широком временном интервале — от 20×10^{-9} до 100×10^{-3} с.. Таким образом, на основе экспериментальных данных и проработки технических решений в виде патентов обосновано создание прецизионной пространственно-временной лазерной системы для взрывных работ в горном деле.

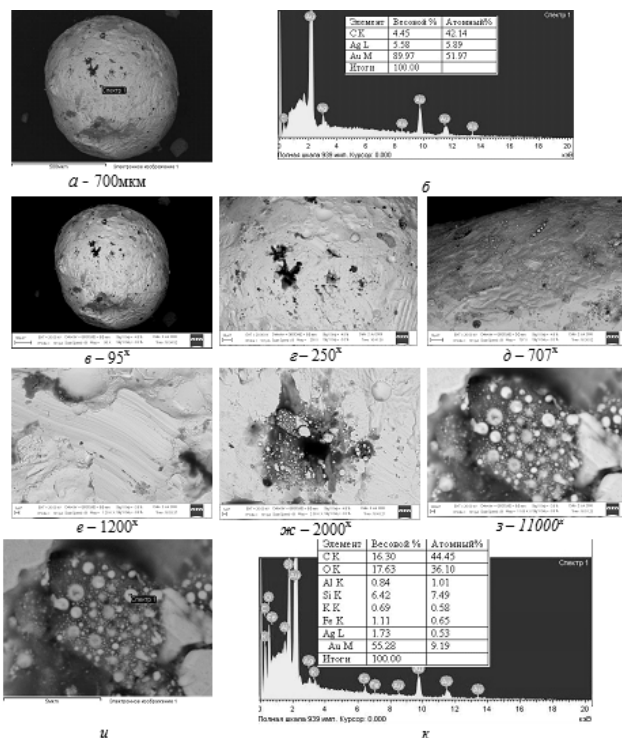


Рис. 2. Изображения агломерированного золота сферической формы и исследованные участки поверхности после воздействия импульсного источника лазерного излучения «Квант-15»: а — изображение агломерата размером 700 мкм, с отмеченной областью элементного анализа; б — спектрограмма и данные элементного энергодисперсионного анализа области, отмеченной на изображении а; в — з — изображения различных поверхностей агломерата золота при соответствующих увеличениях; и — изображения нанометрических объектов с отмеченной областью элементного анализа; к — спектрограмма и данные элементного энергодисперсионного анализа области, отмеченной на изображении. Риски: 500 мкм — а, 100 мкм — в, 20 мкм — г, 10 мкм — д, 2 мкм — е, 1 мкм — ж, 200 нм — з, 5 мкм — и

Обоснование лазерной термообработки дисперсных минеральных сред дано в целом ряде работ [6 — 10], где показано укрупнение микронных частиц благородных металлов в природных минеральных объектах.

В работе применены три источника инфракрасного лазерного излучения (ЛИ). Характеристики источников излучения сведены в таблицу: Ёскат

301Ё — импульсный твердотельный YAG:Nd³⁺ с частотой повторения импульсов до 100 Гц и длительностью светового импульса от 150 мкс до 1 мс; Ёквант — 15Ё — импульсный твердотельный YAG:Nd³⁺ — с длительностью импульса от 1 до 10 мс, с частотой повторения импульсов до 5 Гц с пиковой мощностью от нескольких МВт до 1.2 ГВт, а так же иттербиевая лазерная установка с волоконной системой передачи лазерного излучения ЛС-06. Мощность 600 Вт. Режим работы непрерывный, модуляция до 3 кГц. Спектральная ширина 10 нм. Длина волны $\lambda = 1070$ нм.

Изучалось воздействие лазерного излучения на длине волны $\lambda \sim 1070$ нм, источниками которого служили технологические лазерные установки типа: «Квант — 15» — импульсный твердотельный YAG:Nd³⁺ — миллисекундной длительности (от 10 мкс до 100 мс), с частотой повторения импульсов до 5 Гц с пиковой мощностью от нескольких МВт до 1.2 ГВт, а также иттербиевая лазерная установка с волоконной системой передачи лазерного излучения ЛС-06 мощностью до 600 Вт в непрерывном режиме. Диаметр расфокусированного излучения задавался технологической целесообразностью: воздействие на наибольшее количество минерального сырья с включениями золота при минимальных его потерях на испарение. Осно-

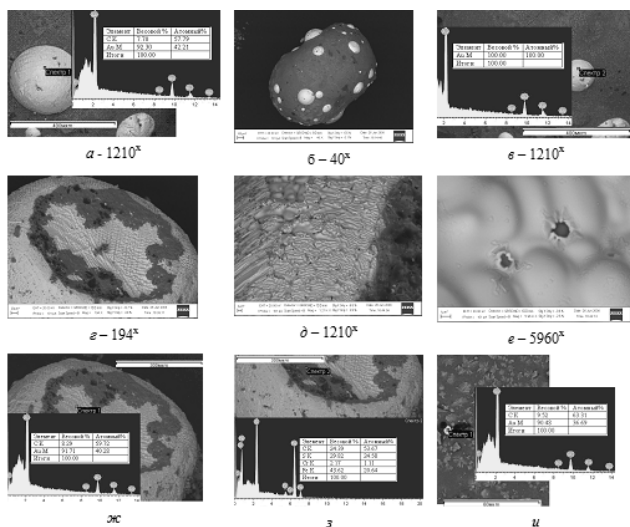


Рис. 3. Растровые изображения агломерированного золота сферической формы и исследованные участки ее поверхности после воздействия непрерывного источника лазерного излучения ЛС-06. Риски: 400 мкм — а, в, 300 мкм — ж, з, 100 мкм — б, 60 мкм — и, 20 мкм — г, 2 мкм — д, 1 мкм — е

вание графитовой кюветы имело форму усеченной сферы или цилиндра, что давало дополнительную фокусировку отраженного лазерного излучения в центральной части обрабатываемых образцов.

Экспериментальные исследования показали возможность укрупнения частиц благородных металлов при обработке лазерным излучением с учетом их свойств [11]. Исследовано воздействие ЛИ на дисперсные минеральные среды, содержащие ультрадисперсное золото. Агломерирование золота подтверждено локальным спектральным анализом. Выявлены качественные и структурные различия рельефа поверхностей рис. 2, 3 при импульсном и непрерывном режимах работы источников лазерного излучения соответственно.

Различия связаны с газодинамическими процессами, происходящими при короткоимпульсном воздействии

миллисекундной длительности и при более длительном временном воздействии от непрерывного источника ЛИ: от 1 до 2 с.. Рельеф поверхности золота при импульсном воздействии имеет менее шероховатую поверхность (рис. 2, в — ж — ув. от 95 до 2000) в отличие от поверхности агломерированного золота, (рис. 3, б — е — ув. от 40 до 5960), образованного в экспериментах с непрерывным источником ЛИ. Вместе с тем, очевидно, что при быстропротекающих термических воздействиях лазерного излучения и в том, и в другом случае происходят газодинамические процессы, приводящие к разрыву сплошности среды на агломерированных поверхностях золота. Но форма таких разрывов имеет различия. При импульсном воздействии — разрывы неправильной формы (рис. 2 — ув. 250, 2000). По краям газовых отверстий выявлено присутствие ожелезненных алюмосиликатов с нанометрическими золото-содержащими включениями (рис. 2 — ув. 2000, 11000;). Стехиометрическим расчетом выявлены соотношения элементного состава в определяемых областях рис. 2, а, — $Au_3Ag_5C_46$, в нанометрической области, рис. 2, и — $Au_2Ag_3Fe_6K_8Si_{12}Al_{12}O_{21}C_{27}$.

В режиме непрерывного лазерного излучения, образующиеся поверхности золотых агломератов имеют сложную структуру. Состоят из полусферических агломератов с размерами порядка 300 — 100 мкм и менее. Визуально видна сильная шероховатость

Таблица

Оценка рисков разработки лазерных оптических систем

Простые риски	Оценка вероятности наступления	Оценка ущерба для проекта	Общий балл
А. Научные риски — связанные с научной разработкой — 1,3 баллов			
1. Неправильные исходные теоретические расчеты и оценки	0,1	3,0	0,3
2. Отрицательный результат теоретического обоснования идеи	0,1	3,0	0,3
3. Невозможность защитить интеллектуальную собственность	0,1	1,0	0,1
4. Несанкционированное использование идеи	0,2	3,0	0,6
Б. Технические риски — 2,8 баллов (разработка технического и технологического решения)			
5. Невозможность технической реализации идеи	0,3	1,0	0,3
6. Увеличение объемов разработок	0,3	2,0	0,6
7. Снижение качества разработок	0,4	4,0	1,6
8. Отсутствие необходимой технологической базы	0,1	1,0	0,1
9. Отсутствие необходимой элементной базы	0,1	1,0	0,1
10. Выявление экологических проблем при использовании	0,1	1,0	0,1
В. Производственные риски — 12,8 баллов			
11. Ошибки в стратегии организации серийной разработки (производства)	0,2	2,0	2,5
12. Отсутствие необходимых производственных мощностей	0,1	1,0	0,1
13. Высокая стоимость комплектующих	0,2	2,0	0,4
14. Плохое качество выполнения заказов субподрядчиками	0,3	2,0	0,6
15. Увеличение стоимости наемного труда	0,5	3,0	1,5
16. Неправильная оценка рынка	0,5	5,0	2,5
17. Неправильное позиционирование разработки	0,2	3,0	0,6
18. Сложность входа на рынок	0,2	5,0	1,0
19. Недостаточная востребованность разработки	0,4	3,0	1,2
20. Ошибочная стратегия работы с потенциальными клиентами	0,4	2,0	0,8
21. Недостаточная эффективность работы с потенциальными клиентами	0,4	2,0	0,8
22. Недооценка конкурентов	0,2	4,0	0,8
Г. Организационные риски — связанные с управлением проектом — 1,3 балла			
23. Увеличение затрат на проект	0,3	3,0	0,9
24. Задержка выполнения этапов	0,3	1,0	0,3
25. Недостаточная квалификация участников проекта	0,1	1,0	0,1

поверхности агломерированного золота (рис 3, г — ув. 194, 1210), Отмечается возникновение разрывов поверхности сферических золотин с размерами порядка 1 мкм (рис. 3). Образование разрывов обусловлено выносом газов из сферических агломератов золота в процессе скоростного лазерного переплава. Вместе с тем, наблюдается структурная упорядоченность образовавшейся гофрированной поверхности агломерированного золота в виде складок с шагом 244 мкм (рис. 3. е — ув. 5960). Стехиометрическим расчетом выявлены соотношения элементного состава в определяемых областях: рис. 3: а — AuC₁₅; в — Au; ж — AuC₁₈ з — Fe₅Cr₅S₈C₂₂, и — AuC₁₅. Размер золотосодержащего агломерата, исследуемого в нанометрической области, рис. 3, и — 500 нм.

Таким образом, лазерная термоактивация в локально-ограниченной зоне расфокусированного излучения генерирует образование упорядоченных структур и инициирует процессы гранулообразования с минимальной поверхностной энергией при лазерной обработке с различными источниками ЛИ. Установлен характер быстропротекающих процессов, приводящий к образованию различных структурных поверхностей золота, а также выявлены общие закономерности агломерирования и концентрирования ультрадисперсного золота, не извлекаемого гравитационными методами.

Учитывая высокий уровень рисков инновационных разработок, прове-

дена их классификация, и дана оценка рисков разработки лазерных оптических систем. В таблице 2 проанализированы и оценены научные, технические и производственные риски, согласно [11, 16]. По балльной шкале оценки рисков выделено три группы рисков: с баллом от 1 до 2 — незначительные риски, специальные меры не принимаются; с баллом от 2 до 4 — значительные риски, для них надо разработать комплекс мер по минимизации вероятности их наступления; с баллом от 4 и более — существенные риски, вероятность их наступления велика и ущерб от их воздействия критичен для проекта.

Из анализа табл. 2 выявлена группа В. — «Производственные риски», являющиеся существенными в разработке лазерных оптических систем. Вероятность их наступления велика и ущерб от их воздействия критичен для разработок. Поэтому комплексом мер по минимизации вероятности наступления таких рисков являются углубленные фундаментальные исследования в области разработок лазерных технологий .

Таким образом, применение лазерного излучения в горном деле, действительно, позволяет решать целый ряд задач на качественно новом уровне, что может свидетельствовать о перспективности продолжения разработок как для разрушения горных пород, так и добычи и переработки минерального сырья, включая техногенных и промышленные отходы.

Статья подготовлена по государственному контракту № 6.552.11.7027 на выполнение научно-исследовательских работ от 29 апреля 2011 г. с Министерством образования и науки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разра-*

боток — монография под ред. В.Я. Панченко. — М.: Физматлит, 2009. — 664 с.

2. <http://www.lot-spb.ru>

3. Жуков Е.А., Илюшин М.А., Кузьменко А.П., Н.А. Леоненко. Лазерное инициирование энергонасыщенных составов. Записки горного института 1 ч. / Санкт-Петербургский горный институт. СПб, 2001. С. 186-188. (Т. 148 (1)). ISBN 5-95211-042-5.
4. Энергонасыщенный светочувствительный состав для лазерной системы инициирования (патент) / Н.А. Леоненко, Н.А. Павлова, А.П. Кузьменко, Е.А. Жуков // Патент РФ №2196122 от 30.03.2001.
5. Устройство управления передачей поляризационного лазерного излучения к оптическим детонаторам на основе магнитооптического пространственно-временного модулятора / Кузьменко А.П., Леоненко Н.А., Павлова Н.А., Жуков Е.А. // Патент РФ № 2204876 от 20.05.2003. МПК 7 Н 01 S 3/10, F 42 D 1/04.
6. Леоненко Н. А., А.П. Кузьменко, М.В. Петерсон, Н.А. Кузьменко. Лазерная агломерация ультрадисперсного золота из минеральных и техногенных ассоциаций высокоглинистых песков. // Записки горного института. СПб. 2007. Т171. С.113-116.
7. Кузьменко А.П. Термокапиллярный механизм лазерной агломерации ультрадисперсного и коллоидно-ионного золота / А.П. Кузьменко, Н.А. Леоненко, В.И. Харченко, Н.А. Кузьменко, И.В. Силютин, И.В. Храпов // Письма в «Журнал технической физики». — 2009. — 35(18).
8. Пат. 2255995 Российская Федерация. Способ лазерного формообразования и обогащения благородными металлами минеральных ассоциаций / Шевкун Е.Б., Кузьменко А.П., Леоненко Н.А. и др. заявитель и патентообладатель Институт горного дела ДВО РАН, Тихоокеанский государственный университет. — заявл. 04.12.03; опубл. 10.07.05, Бюл. № 19.
9. 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., Швеиц 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.
10. Пат. 242517 Российская Федерация, МПК E21C 41/00 B03 7/00. Способ освоения месторождений руд самородных металлов. / Секисов Г.В., Авдеев П.Б., Рассказов И.Ю., Леоненко Н.А.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела ДВО РАН. — № 2009149111/03, заявл. 28.12.2009; опубл. 27.07.2011 Бюл. № 21.
11. Леоненко Н.А., Кузьменко А.П., Силютин И.В., Капустина Г.Г., Швеиц Н.Л. Особенности агломерирования ультрадисперсного золота при импульсном и непрерывном лазерном воздействии. // ГИАБ — 2009. — № ОВ 4. — 400 с. — М.: Изд. ЁГорная книгаЁ. С. 328-337.
12. Фонд ТВН СПб-ГТУ, с Интернет-сайта Фонда содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере: www.fasie.ru
13. Договорные отношения при создании и использовании инноваций. / Под ред. В.И. Сергиенко. Владивосток: Дальнаука, 2003. 76 с. (Серия «Инновационная деятельность»; вып. 4)
14. www.ed.gov.ru
15. www.fondtvn.spb.ru
16. www.dis.ru **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Леоненко Нина Александровна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории "Проблем освоения рудных и нерудных месторождений открытым способом", Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, ул. Тургенева 51, leonenko@igd.khv.ru;

