

УДК 681.7.069.223:621.791.72:903.32

ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ИСТОРИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ

В.А. Парфенов, А.Н. Геращенко, М.Д. Геращенко, И.Д. Григорьева

Представлены результаты экспериментальных работ по лазерной очистке исторических памятников из меди. Очистка поверхности производилась при помощи импульсного Nd:YAG лазера (длина волны 1064 нм, длительность импульса 30–110 мкс, плотность энергии 10–25 Дж/см²). Эффективность лазерной обработки контролировалась с помощью рентген-флуоресцентного спектроанализатора. Проведенные исследования продемонстрировали высокую эффективность лазерной очистки и возможность применения лазера с указанными параметрами при реставрации выколотной медной скульптуры.

Ключевые слова: лазерная очистка, импульсный Nd:YAG лазер, памятники истории и культуры, реставрация, рентген-флуоресцентный спектральный анализ.

Введение

В последние годы лазерная техника находит все более широкое применение в реставрации произведений искусства [1, 2]. Одно из основных применений лазеров в данной области – это очистка поверхности исторических памятников от загрязнений и природных наслоений [3]. В статье представлены результаты экспериментальных работ по лазерной очистке фрагментов экстерьерных памятников Санкт-Петербурга, которые проводились в 2007–2009 гг. в рамках сотрудничества Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета с рядом музеев и реставрационных компаний. Основная цель работы состояла в отработке технологии лазерной очистки и выработке практических рекомендаций для специалистов-реставраторов по ее применению при работе с конкретными видами памятников.

В качестве комментария следует отметить, что хотя впервые лазеры были использованы в реставрации еще в начале 1970-х годов [4], в настоящее время метод лазерной очистки хорошо отработан только применительно к каменным памятникам, а при работе с историческими объектами из металлов он нуждается в дополнительном изучении и отработке технологии. Однако даже при очистке камня до сих пор остается много открытых вопросов, в том числе проблема удаления биогенных загрязнений. Заметим также, что, несмотря на значительный опыт применения лазеров в реставрации за рубежом, в России применение лазерных технологий в этой области началось сравнительно недавно. Таким образом, поставленные в работе задачи исследования являются актуальными как с научной, так и с практической точек зрения.

Традиционные методы очистки памятников в реставрации

Очистка поверхности произведений искусства и иных объектов культурно-исторического наследия от загрязнений и природных наслоений является одним из важнейших этапов реставрации. Традиционные методы очистки памятников основаны, главным образом, на использовании механического и химического воздействия, в том числе разнообразных ручных инструментов (скребков, кисточек, щеток и т.д.), растворителей и моющих средств [5]. К сожалению, такие методы не всегда позволяют добиться желаемых результатов. Основные их недостатки – возможное изменение, повреждение и даже удаление части исторического материала, что является неприемлемым в практике реставрации. Другая проблема заключается в том, что при очистке механическим способом реставраторы зачастую сталкиваются с невозможностью удаления загрязнений с труднодоступных участков объекта (складки одежды у скульптур, орнаментальный рельеф на фасадах исторических зданий и т.д.). Кроме того, применение моющих средств и растворителей и пролонгирующий эффект их воздействия может вызвать дальнейшее изменение физико-химических свойств и ухудшение внешнего

облика исходного материала. Как будет видно из последующего изложения, технология лазерной очистки представляет собой альтернативу традиционным методам реставрации.

Физические принципы лазерной очистки памятников

В основе технологии лазерной очистки лежит локальный нагрев слоя загрязнений под воздействием лазерного излучения с последующим его удалением с поверхности памятника в результате фотоабляции. Фотоабляция (греч. φως – свет, позднелат. *ablatio* – отнятие) представляет собой процесс удаления частиц загрязняющего вещества с поверхности обрабатываемого объекта в результате поглощения им высокоинтенсивного света лазера. Физическая природа этого явления довольно сложна и сочетает в себе как испарение инородных частиц, так и их удаление в твердой фазе [3, 6]. В упрощенном виде процесс удаления загрязнений в результате быстрого термического поглощения энергии лазерного излучения частицами загрязняющего вещества схематически показан на рис. 1.

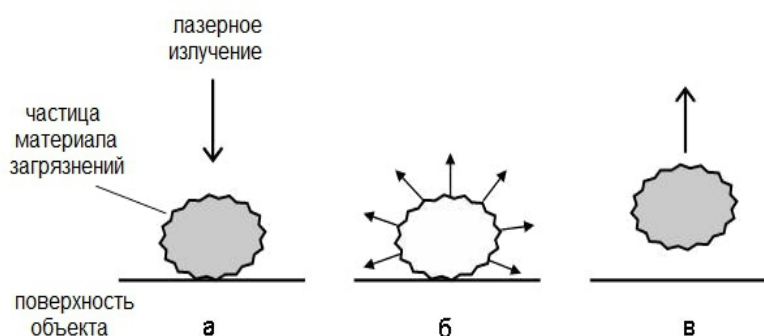


Рис. 1. Принцип лазерной очистки

Различают два вида фотоабляции: фототермическую и фотохимическую. При очистке камня и металлов удаление загрязнений происходит, в основном, в результате фототермической абляции, а при очистке произведений живописи, напротив, преобладают процессы фотохимической абляции. В обоих случаях для того, чтобы при лазерной очистке происходило селективное удаление одних лишь поверхностных загрязнений без повреждения субстрата, следует принимать в расчет его физико-химические и оптические свойства, что на практике приводит к необходимости применения вполне определенных типов лазеров и индивидуального подбора их выходных параметров в каждом конкретном случае.

Для удаления загрязняющего вещества необходимо, чтобы плотность энергии лазерного излучения превышала некоторый минимальный пороговый уровень, при котором начинается процесс абляции. Но при этом работать можно только при таких уровнях плотности энергии излучения, которые лежат ниже порогового уровня абляции подложки (т.е. материала самого памятника). Это наглядно показано на рис. 2, где приведены характерные кривые, показывающие качественный характер зависимости степени фотоабляции слоя загрязнений и подложки при воздействии на них излучением импульсного лазера.

Помимо плотности энергии, другим важным параметром является длина волны излучения лазера. Ее нужно выбирать таким образом, чтобы слой загрязнений имел более высокий (по сравнению с подложкой) коэффициент оптического поглощения. В этом случае по мере удаления слоев загрязнений (интенсивно поглощающих свет лазера) лазерный пучок будет постепенно приближаться к материалу подложки (т.е. к поверхности памятника), который при правильном выборе длины волны излучения лазера

почти не поглощает его излучение. После полного удаления загрязнений процесс фотоабляции самопроизвольно прекращается, так как практически весь падающий свет будет отражаться от поверхности памятника.

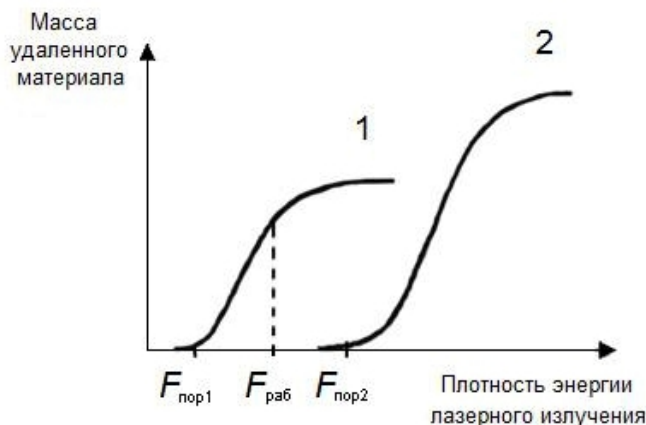


Рис. 2. Характерные зависимости степени абляции материала загрязнения (1) и материала памятника (2) от энергии лазера: $F_{\text{пор1}}$ – пороговый уровень фотоабляции вещества загрязнения, $F_{\text{пор2}}$ – пороговый уровень фотоабляции материала памятника, $F_{\text{раб}}$ – рабочий уровень плотности энергии лазера, который нужно поддерживать для селективного удаления загрязнений в процессе лазерной очистки памятника

Таким образом, при правильном выборе параметров лазера лазерная обработка является селективным и полностью управляемым процессом, что позволяет исключить риск повреждения поверхности памятника. Это выгодно отличает лазерную очистку от, например, химической обработки, при которой неконтролируемому воздействию химического реагента подвергается не только область обработки, но и вся прилегающая часть поверхности объекта (которая чаще всего не нуждается в очистке). В этом заключается принципиальное отличие лазерной очистки от традиционных методов реставрации – обработка поверхности памятника с помощью лазера является наиболее щадящей технологией, которая позволяет эффективно удалять даже самые стойкие загрязнения и при этом не только не повреждать поверхность объекта, но и сохранять оригинальную (историческую) патину.

К сказанному выше следует добавить, что для обеспечения лучшей сохранности объекта реставрации целесообразно применение так называемой влажной лазерной очистки [3]. В этом случае на поверхность объекта перед обработкой наносят тонкий слой воды (или спиртосодержащей жидкости), которая проникает внутрь слоя загрязнений. При быстром термическом расширении и абляции частиц этого слоя степень термического воздействия лазерного излучения на поверхность памятника оказывается меньше, чем при сухой очистке, поскольку в процессе адгезии, помимо сил Ван-дер-Ваальса, участвуют также капиллярные силы [7]. Кроме того, свой вклад вносит еще и энергия «термовзрыва», возникающего при вскипании молекул воды в порах загрязняющего вещества в результате поглощения им световой энергии лазерного излучения.

Экспериментальные результаты

Объекты исследования

Типичными материалами петербургских памятников из металлов являются медь, бронза и чугун, а для каменной скульптуры характерны мрамор, известняк и гранит. В качестве основного объекта исследования в данной работе использовались фрагменты так называемой выколотной медной скульптуры с центральной башни здания Главного Адмиралтейства и крыши Зимнего дворца в Санкт-Петербурге. Проводились также и

эксперименты по лазерной очистке памятников из мрамора, включая удаление с их поверхности микроскопических грибов и других биологических поражений, что составляло отдельную и очень важную часть наших исследований. Но эти вопросы заслуживают отдельного серьезного обсуждения и будут рассмотрены в более поздних публикациях авторов.

Подвергавшиеся лазерной обработке фрагменты медных памятников имели характерные для подобных объектов загрязнения и поражения поверхностного слоя. Под воздействием влажной атмосферы, солевых и сернокислых соединений в воздухе медь разрушается с образованием хлоридов, сульфатов, сульфидов, зеленых карбонатов, черной окиси и красной закиси меди. При этом цвет, состав и строение коррозионного слоя зависит от присутствия в воздухе различных газов, твердых частиц разных веществ, а также от состава самого медного сплава.

Экспериментальное оборудование

Эксперименты по лазерной очистке фрагментов медных памятников были выполнены при помощи специализированного реставрационного лазера Smart Clean II (производство компании EIEp Spa., Италия). Это импульсный Nd:YAG лазер, предназначенный для очистки поверхности исторических объектов из камня и металла. Основные характеристики его излучения таковы: длина волны $\lambda=1064$ нм, длительность импульса – 30–110 мкс, энергия – 0,2–2 Дж, частота повторения импульсов – 1–30 Гц. В качестве комментария заметим, что в блоке питания лазера (в цепи разряда лампы накачки) используется специальная электронная схема, которая позволяет обеспечить нетипичную для режима свободной генерации (очень малую) длительность импульса. Именно эта особенность позволяет использовать данный лазер как для очистки мрамора (где указанная длительность импульса является оптимальной [8]), так и исторических объектов из металлов [9].

С целью уменьшения риска возможных повреждений медной поверхности использовался метод влажной лазерной очистки. Работы по очистке всех экспериментальных образцов начинались с пробных расчисток отдельных небольших (размером около 2×2 см²) участков, причем при самых низких уровнях плотности энергии излучения. Затем плотность энергии постепенно увеличивалась для достижения требуемой степени очистки (решение о приемлемости результатов лазерной обработки принималось специалистами-реставраторами).

Обработка поверхности медных пластин производилась лазерным пучком диаметром около 2 мм. Доставка лазерного излучения в зону обработки и его сканирование по поверхности очищаемого предмета осуществлялись посредством оптоволоконного кабеля с ручным «фокусатором», входящего в состав лазерной установки (рис. 3). Рабочие уровни плотности энергии, при которых выполнялась очистка, составляли 10–25 Дж/см² (разброс значений связан с характером загрязнений на различных участках поверхности), а частота повторения импульсов – 5–10 Гц. При указанных выходных параметрах лазера с поверхности меди были успешно удалены не только очаги коррозии, но и самые стойкие загрязнения.

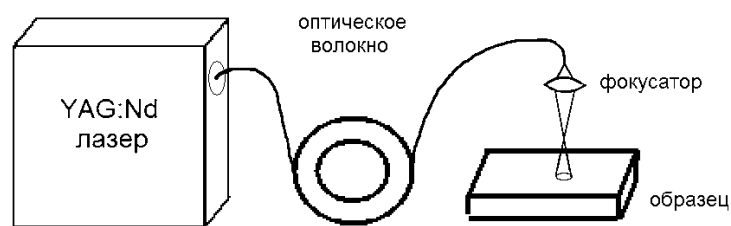


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Состояние поверхности образцов контролировалось при помощи оптического (модель МБС-10, Россия) и электронного сканирующего (модель АВТ-55, изготовитель – фирма Acashi, Япония) микроскопов. Анализ этих изображений (особенно показательны изображения, полученные на электронном микроскопе) показал, что на поверхности меди имеются следы микроплавления (см. рис. 4)). Однако такие микроповреждения были признаны реставраторами вполне приемлемыми. Дело в том, что традиционная механическая очистка экстерьерной выколотной скульптуры из меди осуществляется металлическими ручными и электромеханическими щетками, что зачастую приводит к появлению глубоких царапин. Кроме того, после очистки выколотная скульптура обычно грунтуется, а затем окрашивается. Поэтому отмеченные при лазерной обработке микродефекты поверхности никак не могут сказаться на экспозиционном виде и сохранности таких памятников.

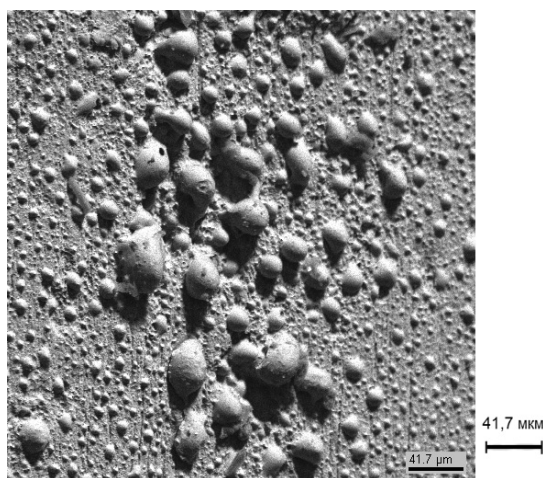
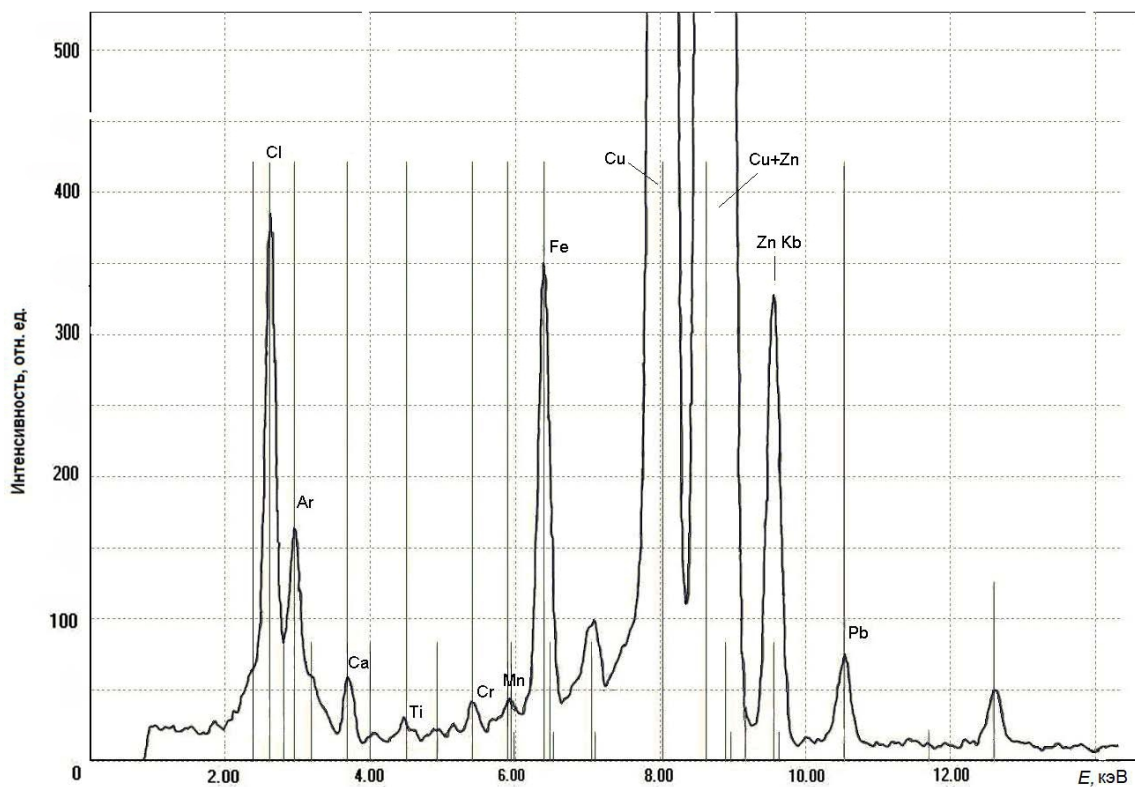
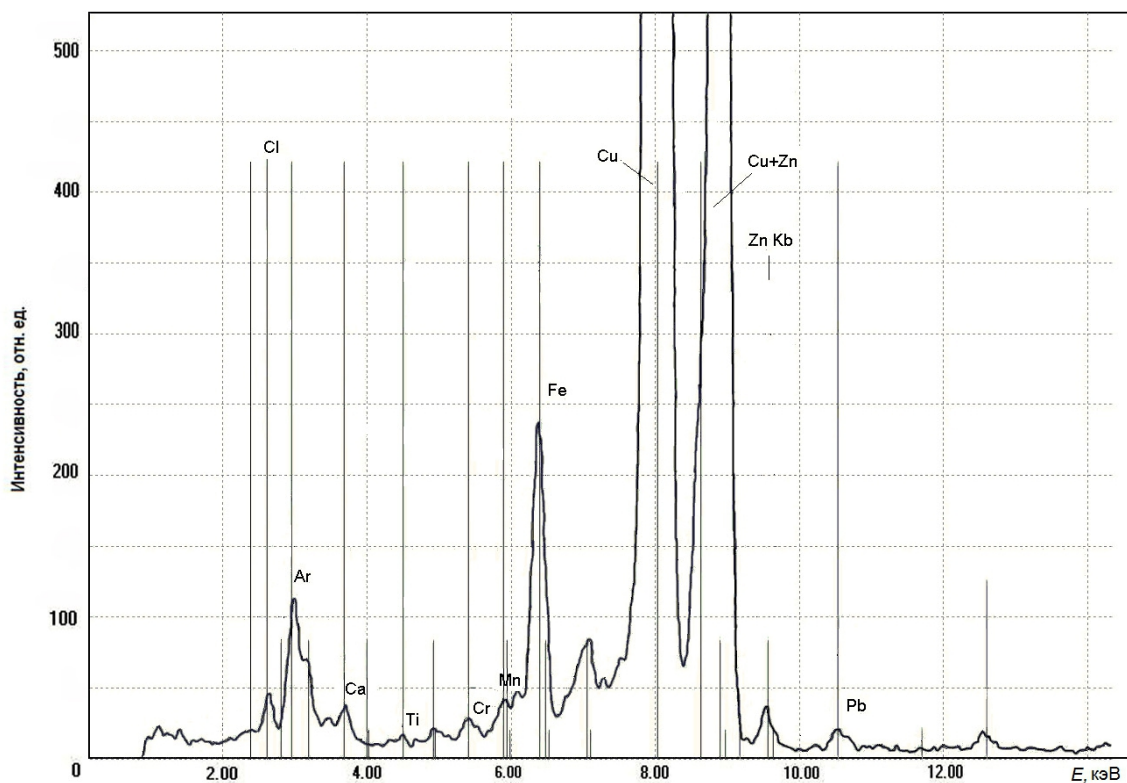


Рис. 4. Изображение поверхности медного памятника после лазерной обработки, полученное на электронном сканирующем микроскопе

Совсем другое дело – химическая чистота лазерной очистки. Рассмотрение этого вопроса было особенно актуально из-за того, что в отечественной реставрационной практике качество очистки памятников обычно оценивается весьма субъективно («на глаз»). С целью количественной оценки результатов работы с лазером были проведены специальные измерения с использованием рентген-флуоресцентного спектрометра (модель «Х-Арт М», разработчик – ЗАО «Комита», Россия). На рис. 5 приведены характерные рентгеновские спектры, полученные до и после завершения процесса очистки. Как видно из рисунка, после обработки лазером спектральные линии, характеризующие наличие хлора, кальция, титана, хрома, железа, цинка и свинца, либо исчезли полностью, либо стали значительно слабее, чем в исходном состоянии медной поверхности. Это свидетельствует о том, что в результате лазерной очистки с поверхности меди были удалены основные виды загрязнений антропогенного характера, которые могли быть результатом воздействия на медь химических примесей ливневых вод и выхлопных газов автомобильного транспорта.



а



б

Рис. 5. Спектры, полученные на рентген-флюоресцентном спектрометре для фрагмента медной скульптуры до (а) и после (б) лазерной очистки

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что лазерная обработка, основанная на использовании эффекта фотоабляции, является эффективным способом очистки медной выколотной скульптуры от характерных природных наслоений и загрязнений, а специализированный реставрационный лазер Smart Clean II может быть рекомендован к использованию при решении подобных задач.

Авторы выражают благодарность В.И. Кудряшову за помощь в проведении измерений на спектроанализаторе «Х-Арт М». Благодарим также А.А. Борхварта (ЗАО «Акме-дек»), предоставившего для исследования фрагменты медных памятников, и К.А. Бурнякову, принимавшую участие в экспериментах.

Литература

1. Salimbeni R. Laser techniques in Conservation in Europe // SPIE Proceedings. – 2005. – V. 5857. – P. 8–18.
2. Парфенов В.А. Лазерные технологии реставрации и исследования произведений искусства // Исследования в консервации культурного наследия. Вып. 2. Материалы международной научно-методической конференции, посвященной 50-летию юбилею ГосНИИР. – М.: Индрик, 2008. – 320 с. – С. 217–226.
3. Cooper M. Laser Cleaning in Conservation: An Introduction, Butterworth-Heinemann. – Oxford, 1998.
4. Lazzarini L., Asmus J.F., Marchesini M.L. Lasers for the cleaning of statuary, initial results and potentialities // 1st Int. Symposium on the Deterioration of Building Stone. – La Rochelle, 1972. – P. 89–94.
5. Никитин М.К., Мельникова Е.П. Химия в реставрации. – Л.: Химия, ЛО, 1990. – 293 с.
6. Luk'yanchuk B.S. Laser Cleaning. – World Scientific Singapore, 2002.
7. Lu Y.F., Ren Z.M. Laser microprocessing and the applications in microelectronics industry // SPIE Proceedings. – 2000. – V. 4157. – P. 191–199.
8. Siano S., Giamello M., Bartoli L., Mencaglia A., Parfenov V., Salimbeni R. Phenomenological characterisation of stone cleaning by different laser pulse duration and wavelength, // J. Nimmrichter, W. Kautek, M. Schreiner (eds.). Laser in the conservation of artworks. – LACONA VI Proceedings, Vienna, Austria, Sept. 21–25, 2005. – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007. – P. 87–96.
9. Siano S., Grazie F., Парфенов В.А. Оптимизированная лазерная очистка позолоченных бронзовых поверхностей // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 7. – С. 18–29.

<i>Парфенов Вадим Александрович</i>	– Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, кандидат технических наук, доцент vadim_parfenov@mail.ru
<i>Геращенко Анастасия Николаевна</i>	– Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, аспирант, orinio@inbox.ru
<i>Геращенко Михаил Дмитриевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, аспирант, sir_kofaioh@inbox.ru
<i>Григорьева Ирина Дмитриевна</i>	– Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, аспирант, grigoryevai@rambler.ru