

От Редакции

В данном разделе журнала публикуется материал о защите первой в нашей стране докторской диссертации по молекулярной одноэлектронике. Работы над диссертацией проходили в тесной связи с исследованиями молекулярных кластеров в Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, которыми руководит доктор химических наук, действительный член Российской академии естественных наук, профессор Губин Сергей Павлович, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, научный руководитель ООО «АкКо Лаб».

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.521

Высокотемпературные одноэлектронные транзисторы на основе молекул и малых наночастиц

Солдатов Е.С.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, <http://www.phys.msu.ru/>

Москва 119991, Российская федерация

E-mail: soldatov.es@physics.msu.ru.

Поступила 16.11.2021, рецензирована 22.12.2021, принята 29.11.2021.

Аннотация: Представлен материал защиты диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук – первой в России докторской диссертации по молекулярной одноэлектронике. Отмечена актуальность разработки, создания и исследования одноэлектронных транзисторов с высокой зарядовой энергией и рабочей температурой для создания применимых в широкой практике принципиально новых нанoeлектронных устройств и обеспечения прорывных исследований в различных областях, показана необходимость использования квантовых точек (молекул/наночастиц) атомарно-молекулярного масштаба для этого, сформулирована постановка задач исследования, перечислены используемые физико-технологические методы изготовления и анализа, приведены основные результаты работы и обсуждено их значение для развития высокочувствительной сенсорики, квантовой информатики и квантовой метрологии.

Ключевые слова: одноэлектронное туннелирование, молекулы, кластеры, наночастицы, наноструктуры, нанoeлектроника, молекулярная электроника

PACS: 73.23.Nk.

Благодарности: Работа поддержана фондом РФФИ, грант № 19-07-01-91.

Для цитирования: Солдатов Е.С. Высокотемпературные одноэлектронные транзисторы на основе молекул и малых наночастиц. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(4):521-528. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.521.

High-Temperature Single-Electron Transistors Based on Molecules and Small Nanoparticles

Evgeny S. Soldatov

Lomonosov Moscow State University, <http://www.phys.msu.ru/>

Moscow 119991, Russian Federation

E-mail: soldatov.es@physics.msu.ru.

Received November 16, 2021, peer-reviewed November 22, 2021, accepted November 29, 2021.

Abstract: The material of the defense of the dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences – the first in Russia doctoral dissertation on molecular single-electronics is presented. The relevance of the development, creation and research of single-electron transistors

with high charge energy and operating temperature for the creation of fundamentally new nanoelectronic devices applicable in wide practice and ensuring breakthrough research in various fields is noted, the necessity of using quantum dots (molecules/nanoparticles) of atomic-molecular scale for this is shown, the formulation of the research problems is formulated, the physical and technological methods of fabrication and analysis used are listed, the main results of the work are presented and their significance for the development of highly sensitive sensing, quantum informatics and quantum metrology is discussed.

Keywords: single-electron tunneling, molecules, clusters, nanoparticles, nanostructures, nanoelectronics, molecular electronics

PACS: 73.23.Hk.

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 19-07-01-91.

For citation: Evgeny S. Soldatov. High-Temperature Single-Electron Transistors Based on Molecules and Small Nanoparticles. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, 13(4):521-528. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.521.

17 июня 2021 года на Диссертационном совете физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова состоялась защита Солдатовым Евгением Сергеевичем диссертации под названием "Высокотемпературные одноэлектронные транзисторы на основе молекул и малых наночастиц" на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Объектом исследования являлись туннельные наносистемы с предельно малой емкостью на основе одиночных молекул и малых наночастиц, а предметом исследования были процессы создания таких наноструктур, а также ход и характеристики туннельного транспорта электронов через них при разных условиях эксперимента.

В целом работа посвящена исследованию процессов формирования управляемых одноэлектронных систем на основе одиночных молекул и малых наночастиц, разработке и созданию на их основе одноэлектронных транзисторов с высокой зарядовой энергией и, соответственно, рабочей температурой, а также исследованию электронного транспорта в таких транзисторах при высоких (более 77 К) температурах.

Такие наноэлементы совершенно необходимы для реализации возможностей использования в широкой практике уникальных свойств эффекта коррелированного (одноэлектронного) туннелирования электронов, позволяющих построение

принципиально новых электронных устройств и кардинальное (на несколько порядков!) улучшение характеристик уже существующих устройств. Только использование таких элементов может повысить рабочую температуру устройств на основе этого эффекта с типичного для традиционных элементов уровня 50-100 мК до приемлемых в практике значений 100-300 К.

Это обусловило большой и непрерывно растущий интерес к разработке способов создания планарных туннельных одноэлектронных элементов на основе отдельных молекул, кластеров, малых наночастиц, воспроизводимому изготовлению таких элементов технологическими методами, уже освоенными современной микроэлектроникой, и исследованию их характеристик. В работе, кроме упомянутых выше вопросов экспериментальной реализации таких предельно малых наноструктур на уровне отдельных молекул и атомов, решаются также и задачи детального выяснения механизмов электронного транспорта через эти квантовые нанообъекты.

Исследования в данной работе сосредоточены на разработке и создании ключевых для любого одноэлектронного устройства элементов – одноэлектронных транзисторов, обладающих высокими значениями зарядовой энергии, определяющей качество и полезность таких транзисторов, а также на исследовании характеристик этих наноэлементов при наиболее удобных для практики но, в то же время, предельно высоких для одноэлектроники температурах выше

77 К. При этом, особенностью одноэлектронных систем является монотонное улучшение их качественных параметров и увеличение рабочей температуры вплоть до комнатной при уменьшении размеров одноэлектронных элементов вплоть до молекулярного и даже до атомного уровня.

Создание наноэлементов проводилось путем совмещения двух инновационных подходов к формированию одноэлектронных элементов:

- использования в качестве основы наноэлемента одиночных молекул (и/или малых наночастиц) необходимого размера и
- использования сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) в качестве устройства как для формирования туннельных наносистем на основе предельно малых объектов с размерами от 5 до 50 ангстрем, так и для изучения электрических характеристик и строения этих систем.

В рамках реализации этих подходов и достижения поставленной цели были последовательно решены три ключевые проблемы, стоящие при создании применимых в широкой практике одноэлектронных элементов и определяющие содержание конкретных основных задач данной работы:

1. Исследование процессов формирования стабильных наноструктур на основе одиночных молекул/наночастиц и, как результат, формирование методико-технологической основы создания изучаемых наноэлементов.
2. Разработка и создание с помощью СТМ туннельных систем на основе одиночных молекул или наночастиц, а также экспериментальное и теоретическое исследование электронного транспорта через такие системы, доказавшее его коррелированный характер даже при комнатной температуре.
3. Разработка, изготовление и исследование планарных молекулярных одноэлектронных транзисторов, работоспособных при высокой, вплоть до 300 К, температуре.

В ходе решения первой проблемы были разработаны методики формирования на твердой подложке стабильных наноструктур из предельно малых молекул, а также методики исследования

строения и характеристик сформированных наноструктур с помощью СТМ. При этом были предложены, разработаны и реализованы два подхода к формированию таких, устойчивых к исследованиям в СТМ, наноструктур на основе создания смешанных ленточных монослоев с перспективными для одноэлектроники объектами молекулярного масштаба ($1\div 5$ нм), стабильных при их исследовании в СТМ.

В первом подходе уже готовые молекулы, в том числе – и неамфифильные, включаются в классические ленточные монослои поверхностно-активных веществ. Его разработка и реализация показала возможность целенаправленно и воспроизводимо получать на подложке устойчивые к измерениям образцы необходимого качества с молекулярными наноструктурами различной размерности: как 0D (одиночные молекулы), так и регулярные 1D (цепочки) и 2D ансамбли. Этот подход обеспечил также создание с помощью СТМ исследовательских прототипов одноэлектронных элементов, как на основе одиночных молекул, так и на основе мультимолекулярных 1- и 2-мерных систем молекул. При этом было обнаружено, что в 2-мерных системах молекул такого типа при определенных условиях происходит их самоорганизация с образованием квазикристаллических планарных наноструктур с выделенными кристаллографическими осями.

Во втором подходе формирование на образце перспективных для одноэлектроники наноструктур проводится в ходе его изготовления путем синтеза наночастиц с необходимыми свойствами и характеристиками прямо в смешанных ленточных монослоях на границе раздела фаз «вода-воздух» путем проведения в них химических реакций и/или физических воздействий во время приготовления монослоя. Это позволило контролируемо получать за счет обнаруженного эффекта анизотропного роста наночастиц в продольном магнитном или электрическом поле как отдельные магнитные частицы с заданными размерами (от $3\div 5$ нм и выше) и формой, так и их цепочки. Построенная теоретическая модель процесса такого роста показала хорошее согласие рассчитанной формы, размеров наночастиц и скорости их

роста с экспериментальными данными. Это свидетельствует о ключевой роли в процессе роста межчастичных диполь-дипольных взаимодействий, лежащих в основе модели, что и определяет обнаруженную сильную зависимость формы и размеров наночастиц от ориентации приложенного поля.

Кроме таких магнитных частиц, усовершенствованный вариант этого подхода позволил контролируемо получать также как монослои с отдельно лежащими наночастицами благородных металлов (золота и палладия) диаметром $1 \div 2$ нм, так и организованные композитные полимерные пленки с 1D и 2D ансамблями таких синтезированных *in situ* наночастиц. Он также позволил получать полимерные пленки с 1D и 2D ансамблями готовых молекул кластеров, встроенных в планарную монослойную мономолекулярную диэлектрическую матрицу. Размеры полученных наночастиц удовлетворяют условиям реализации эффектов одноэлектронного туннелирования при комнатной температуре, что обеспечивает возможность создания таким путем надежных и устойчивых одноэлектронных наносистем.

Созданная в ходе выполнения первой ключевой задачи технологическая база позволила при выполнении второй ключевой задачи работы реализовать способ создания с помощью СТМ одноэлектронных элементов на основе одиночных кластерных молекул и впервые экспериментально показать решающую роль лигандной оболочки молекулы/наночастицы в превращении системы «игла СТМ - кластер - подложка» из однопереходной в двухпереходную и, соответственно, в реализации одноэлектронного режима туннельного транспорта электронов. С помощью этой техники впервые был реализован работающий при комнатной температуре одноэлектронный транзистор на основе одиночной кластерной молекулы. Экспериментально изученные основные характеристики сформированных транзисторов показали, несмотря на существенное различие строения и электронного спектра исследованных кластерных молекул, реализацию во всех таких наносистемах режима коррелированного туннелирования электронов

с рекордно высокими значениями кулоновской блокады туннелирования (более 500 мВ) и зарядовой энергии (~ 250 мэВ). В этих системах также была получена близкая к 100% модуляция туннельного тока управляющим напряжением и типичная для одноэлектронных систем зарядовая чувствительность не хуже $\sim 10^{-3} e/\Gamma\tau^{1/2}$. Это послужило убедительным доказательством коррелированного характера туннельного транспорта электронов в изготовленных молекулярных системах даже при комнатной температуре.

В рамках теоретического исследования электронного транспорта через такие системы был предложен и разработан подход к определению и расчету основного для одноэлектроники параметра – электрической емкости предельно малых, вплоть до одиночных атомов, квантовых объектов и получена формула для расчёта собственной эффективной ёмкости одиночных изолированных нанообъектов атомарного масштаба по значениям их потенциалов ионизации и сродства к электрону. Анализ ее зависимости от размера, формы и топологии показал, что при достаточно большом количестве атомов эта зависимость качественно подобна классическому случаю - ёмкость пропорциональна размеру объекта, причем функциональная зависимость собственной ёмкости таких объектов от числа атомов в них определяется размерностью этих объектов.

С учетом этих результатов предложена и разработана теоретическая модель туннельного транспорта через молекулярные одноэлектронные наноэлементы, учитывающая квантовый дискретный характер энергетического спектра их основы – одиночной квантовой точки (молекулы, малой наночастицы). В ней также впервые были учтены эффекты релаксации электронов в молекуле/квантовой точке. На основе разработанной модели проведено компьютерное моделирование характеристик электронного транспорта изготовленных молекулярных одноэлектронных наноэлементов для случаев предельно быстрой и предельно медленной (по сравнению с темпом туннелирования электронов) энергетической релаксации электронов в молекуле. Предложенная

и реализованная при этом эффективная схема расчета канонического распределения электронов в молекуле рекуррентным методом обеспечила его ускорение на несколько порядков по сравнению с прямым перебором комбинаций и позволила реализовать моделирование и исследование ВАХ молекулярных транзисторов с помощью обычных лабораторных вычислительных мощностей.

Сравнение теоретических и экспериментальных ВАХ молекулярных одноэлектронных транзисторов показало их наилучшее согласие именно при медленной релаксации электронов в молекуле. Это позволяет сделать вывод о том, что режим работы изготовленных и исследованных с помощью СТМ молекулярных одноэлектронных транзисторов – это коррелированное туннелирование электронов с их медленной энергетической релаксацией в молекуле.

Это в целом приводит к выводу о том, что малые кластерные молекулы могут служить надежной основой для создания одноэлектронных наносистем, способных работать при комнатной температуре в качестве элементов действующих принципиально новых устройств нанoeлектроники. Наибольшие прогресс при этом обеспечивает применение созданных молекулярных одноэлектронных транзисторов для построения на их основе сверхчувствительных сенсоров заряда/поля, элементов памяти ЭВМ, фундаментальных стандартов (например, стандарта тока), кубитов, ячеек квантового клеточного автомата.

В ходе работ по решению третьей ключевой проблемы данной работы для обеспечения широкой и эффективной практической реализации указанных выше перспектив, которая возможна лишь для планарных молекулярных устройств в интегральном исполнении, была разработана методика изготовления планарных электродов молекулярного транзистора путем контролируемого сужения сформированного электроннолучевой литографией нанопровода с помощью эффекта электромиграции. Эта методика, за счет использования созданного оригинального алгоритма проведения процесса электромиграции, обеспечила получение электродов с необходимым для

высокотемпературной одноэлектроники расстоянием между ними $1.5 \div 5$ нм с выходом годных более 90% при высоком сопротивлении утечки ($R > 300$ ГОм). Такие параметры свидетельствуют о пригодности таких электродов для создания на их основе молекулярных транзисторов.

Разработанный метод контролируемого встраивания с помощью эффекта диэлектрофореза малых ($2 \div 4$ нм) наночастиц золота в изготовленные нанозазоры между металлическими электродами позволил обеспечить адресность такого встраивания и получить высокий ($\sim 20\%$) выход годных образцов, что в $3 \div 4$ раза больше, чем у традиционного метода высушивания раствора с наночастицами.

Измерения электронного транспорта через такие молекулярные транзисторы показали одноэлектронный вид диаграмм стабильности при $T = 77$ К, продемонстрировали высокие (более 150 мэВ) значения зарядовой энергии изготовленных одноэлектронных транзисторов. Зарегистрирован осциллирующий (одноэлектронный) вид характеристик управления электронным транспортом через них при температурах $77 \div 220$ К, а также показан коррелированный характер транспорта электронов в этих нанoelementах в более широком диапазоне температур $77 \div 300$ К.

Таким образом, проведенные исследования позволили получить следующие основные новые результаты:

Предложен, разработан и впервые реализован способ формирования на твердой подложке смешанных лентмюровских мономолекулярных слоев с контролируемой поверхностной плотностью жестко фиксированных на подложке неамфифильных молекул, обеспечивающих возможность неразрушающего воспроизводимого исследования в СТМ структурных и электрических характеристик наносистем на основе таких одиночных молекул.

Предложен и впервые реализован метод контролируемого формирования на твердой подложке стабильных наноструктур из перспективных для высокотемпературной одноэлектроники одиночных наночастиц золота

с диаметром $1\div 3$ нм путем проведения прямо в монослое химических реакций восстановления металла, обнаружена самоорганизация таких наночастиц в 1-мерные цепочки. Показан коррелированный характер электронного транспорта через двухпереходные туннельные системы на основе таких одиночных наночастиц при комнатной температуре.

Предложен и реализован оригинальный метод контролируемого формирования на твердой подложке стабильных 0-мерных, 1-мерных и 2-мерных наноструктур из малых ($3\div 5$ нм) магнитных наночастиц путем проведения прямо в монослое разложения пентакарбонила железа и дикообальтокарбонила под действием ультрафиолетового излучения с последующей агрегацией продуктов.

Обнаружен и теоретически объяснен анизотропный рост формирующихся магнитных наночастиц в продольном магнитном или электрическом поле, что позволяет контролируемо получать магнитные частицы нужных для формирования наноэлементов размеров и формы.

Обнаружен эффект самоорганизации молекул таллиевого производного карборана в смешанных мономолекулярных лэнгмюровских пленках с образованием двумерных квазикристаллических наноструктур с параметрами решетки, близкими к соответствующим параметрам трехмерного молекулярного кристалла этого вещества.

Впервые экспериментально продемонстрирована принципиальная для одноэлектроники важность наличия лигандной оболочки у наночастицы или молекулы для реализации одноэлектронного режима туннелирования и корреляция размера кулоновской блокады туннелирования электронов с размером молекулы/наночастицы. Одновременно продемонстрирована также возможность целенаправленного изменения структуры и характеристик уже готовой наносистемы непосредственно на подложке.

Впервые создан и исследован прототип молекулярного одноэлектронного транзистора, работающего при комнатной (300 К) температуре, в котором создана наносистема с зарядовой энергией до 250 мэВ, обеспечившая управление

туннельным током одноэлектронного транзистора на основе одиночной молекулы, причем такое управление экспериментально продемонстрировано при комнатной температуре.

Предложенная теоретическая модель коррелированного туннелирования электронов в молекулярных системах с учетом эффектов релаксации электронов в молекуле/квантовой точке позволила впервые доказать медленность релаксации электронов в таких системах по сравнению с темпом туннелирования, в отличие от традиционных одноэлектронных металлических систем, и обеспечить согласие экспериментальных и теоретических данных, полученных для молекулярных транзисторов.

Предложенный и разработанный метод определения электрической ёмкости квантовых объектов атомарно-молекулярного масштаба показал, что величина собственной ёмкости объектов молекулярного и атомарного масштаба непосредственно и тесно связана с их химическими и спектральными свойствами, со строением электронных оболочек атомов и топологией молекул. Получена формула для расчета ее величины по значениям потенциала ионизации и сродства к электрону молекул и атомов. Это позволяет при проектировании и анализе работы практических одноэлектронных устройств проводить расчеты параметров квантовых наноэлементов использованием хорошо разработанного аппарата классической электронной схемотехники без громоздкого рассмотрения и учета специфических квантовых свойств таких объектов, что существенно облегчает широкую практическую реализацию одноэлектронных атомно-молекулярных устройств.

Разработана оригинальная методика воспроизводимого формирования при комнатной температуре ключевого элемента молекулярных одноэлектронных транзисторов в планарном тонкопленочном исполнении - нанозазоров между электродами транзистора с шириной менее 4 нм, сопротивлением утечки более 300 Гом при высоком ($90\div 95\%$) выходе годных образцов. Это, в итоге, обеспечило при изготовлении планарных молекулярных

одноэлектронных транзисторов реализацию основного преимущества использования в них молекул/наночастиц – достижение высокой зарядовой энергии и, соответственно, рабочей температуры таких транзисторов.

Впервые обнаружена и изучена при комнатной температуре квантовая динамика изменений проводимости квантовых проводов из атомов золота, образующихся на заключительном этапе процесса электромиграции. Эти изменения происходят в ходе реструктуризации квантовых проводов из-за релаксации механических напряжений в них, приводящей, в итоге, к разрыву квантовых проводов с образованием нанозазоров шириной менее 4 нм.

Разработана и реализована методика адресного встраивания одиночных малых ($2\div 4$ нм) наночастиц золота в сформированные нанозазоры между туннельными электродами транзистора, обеспечившая формирование высокотемпературных молекулярных одноэлектронных транзисторов с выходом годных образцов около 20%.

Впервые изготовлены и исследованы при температурах $77\div 300$ К планарные одноэлектронные транзисторы с величиной зарядовой энергии до 150 мэВ, в которых коррелированный туннельный транспорт электронов реализуется при температурах до 300 К включительно.

Таким образом, основным итогом данной работы явилось создание молекулярных одноэлектронных транзисторов в планарном исполнении с высокой зарядовой энергией и параметрами, являющимися лучшими из достигнутых к настоящему времени для планарных одноэлектронных элементов. Это открывает широкое окно новых возможностей для реального проектирования, изготовления и использования таких элементов при высоких рабочих температурах, вплоть до комнатной, и, следовательно, позволяет создавать на их основе применимые в широкой практике принципиально новые нанoeлектронные устройства с уникальными характеристиками и возможностями, необходимые для решения актуальнейших проблем в различных областях:

- простого/доступного и быстрого секвенирования ДНК – в биологии и медицине;
- создания квантовых компьютеров, квантовых клеточных автоматов, нейронных сетей – в квантовой информатике;
- создания квантового эталона единицы электрического тока и замыкания, наконец, квантового «метрологического треугольника» напряжение (эффект Джозефсона) – ток (одноэлектроника) – сопротивление (квантовый эффект Холла) – в квантовой метрологии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Солдатов ЕС, Ханин ВВ, Трифонов АС, Преснов ДЕ, Яковенко СА, Хомутов ГБ, Губин СП, Колесов ВВ. Одноэлектронный транзистор на основе одиночной кластерной молекулы при комнатной температуре. *Письма в ЖЭТФ*, 1996, 64(7):510-514.
2. Gubin SP, Soldatov ES, Trifonov AS, Khanin VV. Change in the conductivity of single naked metallic clusters by ligation. *Mendeleev Communications*, 1997, 7(1):30-32; doi: 10.1070/mc1997v007n01abeh000772.
3. Зубилов АА, Солдатов ЕС, Мевх НГ, Ханин ВВ. Одноэлектронное туннелирование в двухпереходной туннельной системе на основе одиночной молекулы ферритина. *Радиотехника и электроника*, 2000, 45(11):1373.
4. Shorokhov VV, Johansson P, Soldatov ES. Simulation of characteristics of a molecular single-electron tunneling transistor with a discrete energy spectrum of the central electrode. *J. Appl. Phys.*, 2002, 91:3049.
5. Gubin SP, Gulayev YuV, Khomutov GB, Kislov VV, Kolesov VV, Soldatov ES, Sulaimankulov KS, Trifonov AS. Molecular clusters as building blocks for nanoelectronics: the first demonstration of cluster SET transistor at room temperature. *Nanotechnology*, 2002, 13(2):185-194; doi: 10.1088/0957-4484/13/2/311.
6. Soldatov ES, Gubin SP, Kolesov VV, Khomutov GB, Maximov IA, Sergeev-Cherenkov AN, Suyatin DB, Shorokhov VV, Sulaimankulov KS. Molecular cluster based nanoelectronics. *Microelectronic Engineering*, 2003, 69:536-548.

7. Khomutov GB, Gainutdinov RV, Gubin SP, Kislov VV, Khanin VV, Rakhnyanskaya AA, Sergeev-Cherenkov AN, Soldatov ES, Suyatin DB, Taranov IV, Tolstikhina AL. Organized planar nanostructures from ligand-stabilized nanoclusters: a route to molecular nanoelectronic devices. *Applied Surface Science*, 2004, 226(1-3):149-154; doi: 10.1016/j.apsusc.2003.11.015.
8. Порохов ВВ, Солдатов ЕС, Губин СП. Собственная емкость наноразмерных объектов. *Радиотехника и электроника*, 2011, 56(3):352-369.
9. Dagesyan S, Stepanov A, Soldatov E, Snigirev O. Properties of Extremely Narrow Gaps Between Electrodes of a Molecular Transistor. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2015, 28(3):787-790; doi: 10.1007/s10948-014-2875-7.
10. Galstyan A, Dagesyan S, Soldatov E. Creating the single-electron transistor by electromigration and electrotrapping. *Proc. of 26th Int. Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (Crimico'2016)*, vol. 7, pp. 1520-1526. Russia, Sevastopol, SevSU Publ., 1916.

Солдатов Евгений Сергеевич

д.ф.-м.н., с.н.с.

Московский государственный университет им.

М.В. Ломоносова

Москва 119991, Россия

E-mail: soldatov.es@physics.msu.ru.