

Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,  
НАНОСТРУКТУР  
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

***МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ***

**выпуск 9**

**ТВЕРЬ 2017**

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения об рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

**Официальный сайт издания в сети Интернет:**

**[www.physchemaspects.ru](http://www.physchemaspects.ru)**

**Ф50** Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2017. – Вып. 9. – 592 с.

ISBN 978-5-7609-1275-6

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1275-6

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2017

© Тверской государственной  
университет, 2017

УДК 531.1

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ  
ЗОНД СТМ – ОБРАЗЕЦ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ:  
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ШТАТНОМУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ  
РЕЖИМУ РАБОТЫ**

А.С. Антонов<sup>1</sup>, Д.Н. Соколов<sup>1</sup>, Н.Ю. Сдобняков<sup>1</sup>, А.Ю. Колосов<sup>1</sup>, В.С. Мясниченко<sup>1</sup>,  
В.И. Романовский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»  
170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный технологический университет»  
220006, Республика Беларусь, Минск, ул. Свердлова, 13а  
nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.006

**Аннотация:** Методом Монте-Карло с использованием многочастичного потенциала Гупта проведено моделирование взаимодействия системы зонд (медь) – образец (золото) при термическом расширении в зависимости от расстояния между ними. Моделирование проведено для двух типов рельефа: «волна» и «зерно». Установлено, что тепловое расширение острия может достигать величин, сравнимых с шириной туннельного промежутка, и возможно возникновение лавинообразного процесса теплового расширения острия, приводящего к возникновению контакта между острием зонда и поверхностью образца. Сформулированы рекомендации по штатному технологическому режиму работы сканирующего туннельного микроскопа.

*Ключевые слова:* метод Монте-Карло, потенциал Гупта, сканирующая зондовая микроскопия, контакт зонд-образец.

## **1. Введение**

С помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) возможно проводить исследования локальной электронной структуры проводящих поверхностей с атомным разрешением. Знание структуры зонда важно для качественной интерпретации данных СТМ с атомным разрешением, улучшения параметров пространственного разрешения, поскольку электронная структура острия зонда влияет на условия туннелирования электронов в разных участках образца. Хотя к настоящему времени существует способ получения зондов с заданной электронной структурой при использовании ориентированных монокристаллических игл с заранее известной кристаллографической структурой [1], актуальной задачей является моделирование процессов, происходящих при технологическом использовании зонда.

Кроме того, при изменении напряжения между острием и образцом может происходить термический разогрев острия, вызванный энергией, выделяющейся в приповерхностной области острия в процессе туннелирования электронов (термическое расширение острия, связанное с выделением энергии Джоуля-Ленца и энергии Ноттинггама) [2]. Этот эффект может оказать влияние на вольт-амперные характеристики

туннельного барьера, т.к. ширина зазора зависит от приложенного напряжения.

Известно, что существенная часть ошибок измерений параметров нанорельефа поверхности туннельным микроскопом может быть обусловлена особенностями управления движением зонда [3-5]. Таким образом, с одной стороны учет геометрии острия иглы при интерпретации измерений позволяет существенно уменьшить вклад указанных ошибок, с другой стороны уже разработаны запатентованные методы обработки изображений, повышающие уровень соответствия рельефа поверхности физическим условиям сканирования [6].

Таким образом, математическое моделирование изменения формы и размеров острия в процессе сканирования является актуальным и существует возможность, используя имеющиеся результаты измерений нанорельефа, определять их именно из математической модели процесса сканирования. Влияние на получаемые результаты сканирования также могут оказывать колебания основания туннельного микроскопа и колебания подвеса зонда [7]. Однако использование тензоплатформ и лабораторных столов с антивибрационным покрытием к настоящему времени позволяет существенно снизить степень влияния вышеназванных факторов.

## 2. Постановка задачи

В [8] нами было проведено моделирование взаимодействия острия зонда (медь) с поверхностью образца (золото). В качестве подложки использовалась модельная металлическая пленка с ювенильной поверхностью.

Переход к рассмотрению характера взаимодействия зонда СТМ в процессе нагревания при прохождении туннельного тока с образцом со сложным рельефом (схематически изображен на рис. 1) позволяет выявить специфические особенности, которые более вероятно могут проявляться при повседневной работе с СТМ, которые должны быть учтены в штатном технологическом режиме работы СТМ.

Для описания профиля рельефа подложки мы использовали периодические функции вида:

$$f(x) = B\cos(x), g(x, y) = D\cos(x)\cos(y). \quad (1)$$

Причем если в данной работе мы ограничиваемся условием для амплитуд профиля  $B = const, D = const$ , то для моделирования реальных высотных параметров профиля рельефа достаточно будет задать следующие условия  $B = B(x), D = D(x, y)$ . В дальнейшем профиль, описываемый функцией  $f(x)$ , относим к типу «волна»,  $g(x, y)$  – к типу «зерно» (см. рис. 2). Заметим, что

в настоящее время оба типа покрытий уже находят свое практическое применение в микро- и нанoeлектронике [9, 13].

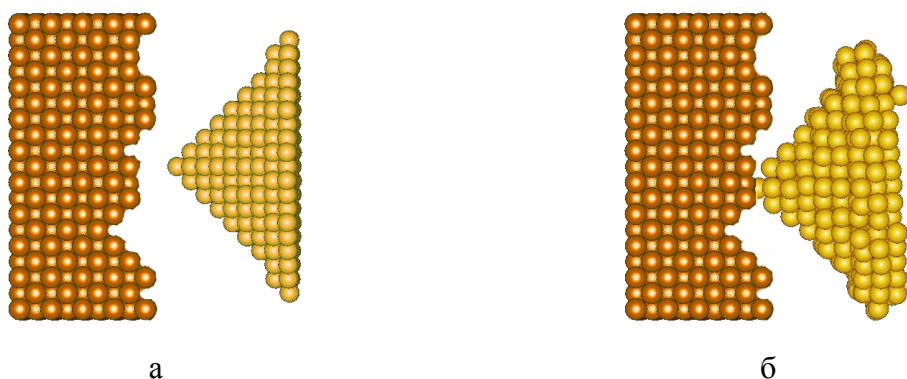


Рис. 1. Схематическое описание сценария взаимодействия в системе острие-образец: а – начальная конфигурация моделируемой системы; б – один из возможных сценариев, реализуемых в процессе компьютерного эксперимента по моделированию взаимодействия зонда СТМ и поверхности образца, имеющей достаточно сложный развитый рельеф [9].

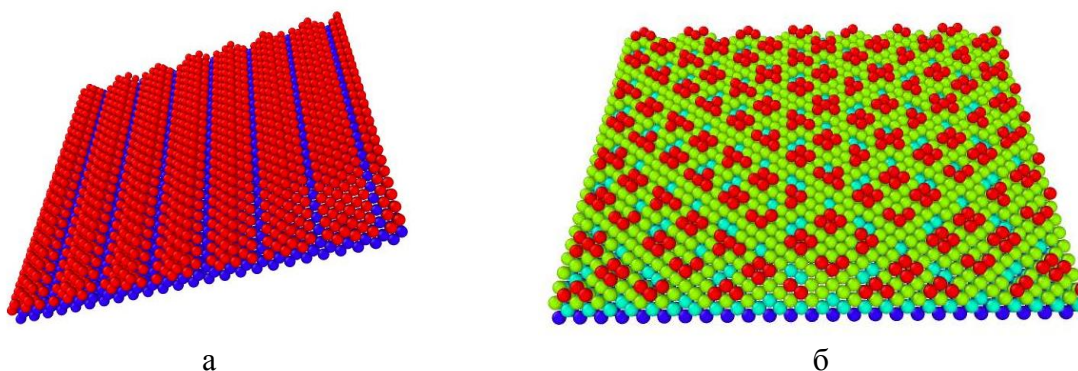


Рис. 2. Схематическое изображение рассматриваемых в работе профилей рельефа: а – тип «волна», б – тип «зерно». Цвета обозначают высотные параметры: красный цвет – пики, голубой цвет – впадины, зеленый цвет – «нулевой уровень», синий цвет – внутренние атомы подложки.

Подобный выбор функций для описания профиля рельефа кажется вполне логичным и обоснованным. В частности, в работе [10] исследовались вольт-амперные характеристики контакта металл – металл пленок золота на поверхности поликарбоната со структурой типа «волна». Кроме того, в настоящее время большинство использующихся пленок благородных металлов получается методами термического или электронно-лучевого испарения, магнетронного распыления, катодного распыления [11-13]. При этом использование каждого из вышеперечисленных методов позволяет получать рельеф поверхности, имеющий свои характерные особенности. Например, при термическом испарении поверхностные неоднородности, как правило, характеризуются высотой до 35 нм и диаметром 30–50 нм, при магнетронном напылении

обнаруживаются характерные неоднородности с поперечными размерами 50–70 нм, в то время как при катодном напылении элементы рельефа характеризуются неоднородностями различных поперечных размеров. Таким образом, возможность экспериментального получения периодических структур (структур с повторяющимися элементами рельефа) зависит как от метода напыления, так и от свойств самого пучка. Например, для ультратонких пленок золота важной характерной особенностью является повторение рельефа подложки [14].

В данной работе в качестве материала зонда используется медь, в качестве образца – золото. Медь выбрана в качестве металла, из которого изготовлен зонд, поскольку параметры потенциала Гупта для системы вольфрам – золото (вольфрамовая проволока традиционно используется для изготовления зондов [1]) в литературе не встречаются, что, по-нашему мнению, не изменит качественно результаты моделирования.

Для описания взаимодействия использовался многочастичный потенциал Гупта:

$$U = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j \neq i}^N A \exp \left( -p \left( \frac{r_{ij}}{r_0} - 1 \right) \right) - \left[ \sum_{j \neq i}^N \zeta^2 \exp \left( -2q \left( \frac{r_{ij}}{r_0} - 1 \right) \right) \right]^{1/2} \right\}. \quad (2)$$

Здесь  $r_{ij}$  – расстояние между атомами  $i$  и  $j$  в кластере, параметр  $A$  – экспериментальное значение энергии когезии,  $r_0$  – параметр кристаллической решётки,  $p$  и  $q$  – значения упругих постоянных кристаллической структуры при  $T=0$  К, данные параметры для системы медь-золото взяты из работы [15]. Атомы поверхности образца «заморожены», т.е. роль поверхности образца фактически сводится к моделированию некоторого силового поля.

Таким образом, целью настоящей работы является проведение компьютерного эксперимента методом Монте-Карло [16] с использованием многочастичного потенциала Гупта для установления закономерностей взаимодействия зонда СТМ при тепловом расширении с образцом для двух типов сложного развитого рельефа: «волна» и «зерно», а также формулировка рекомендаций по штатному технологическому режиму работы сканирующего туннельного микроскопа.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 3-10 представлены результаты моделирования взаимодействия системы зонд (медь) – образец (золото) для типов подложки «зерно» и «волна» при различных начальных расстояниях между зондом и образцом. Численный анализ структуры поверхности образца и острия зонда, визуализацию и рендеринг рассматриваемой нами наносистемы мы проводили с использованием программы Ovito [17].

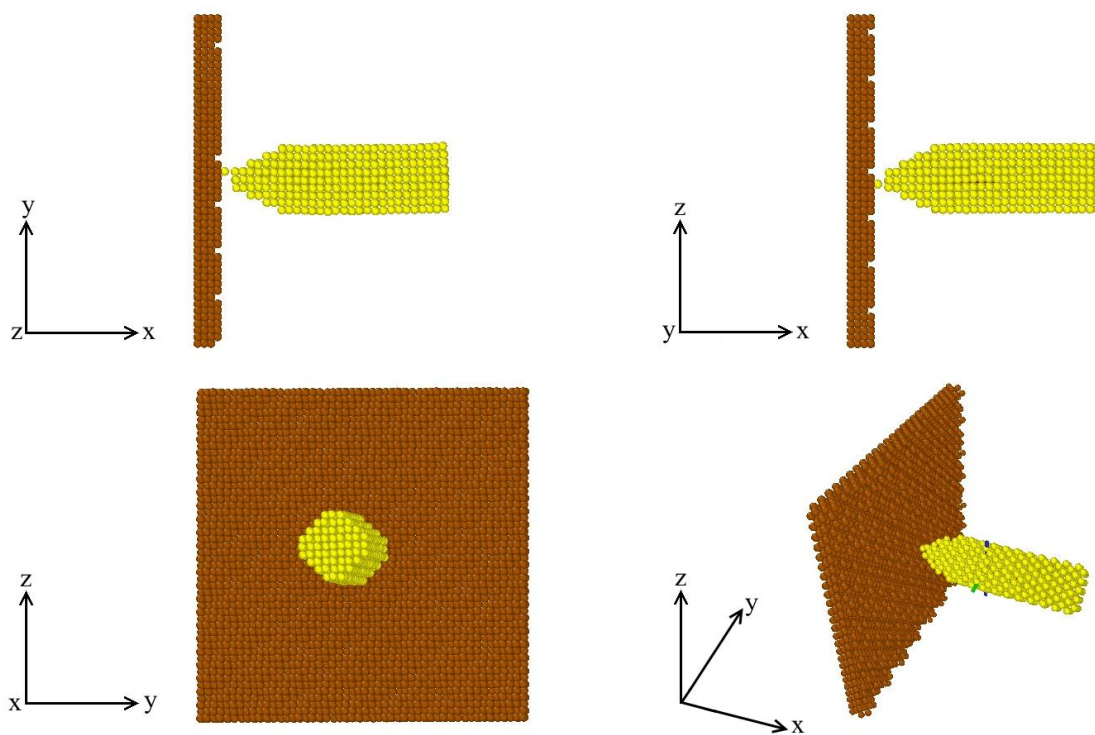


Рис. 3. Панорамные изображения физического контакта в системе зонд (медь) – образец (золото), тип подложки «зерно», расстояние 0,05 нм.

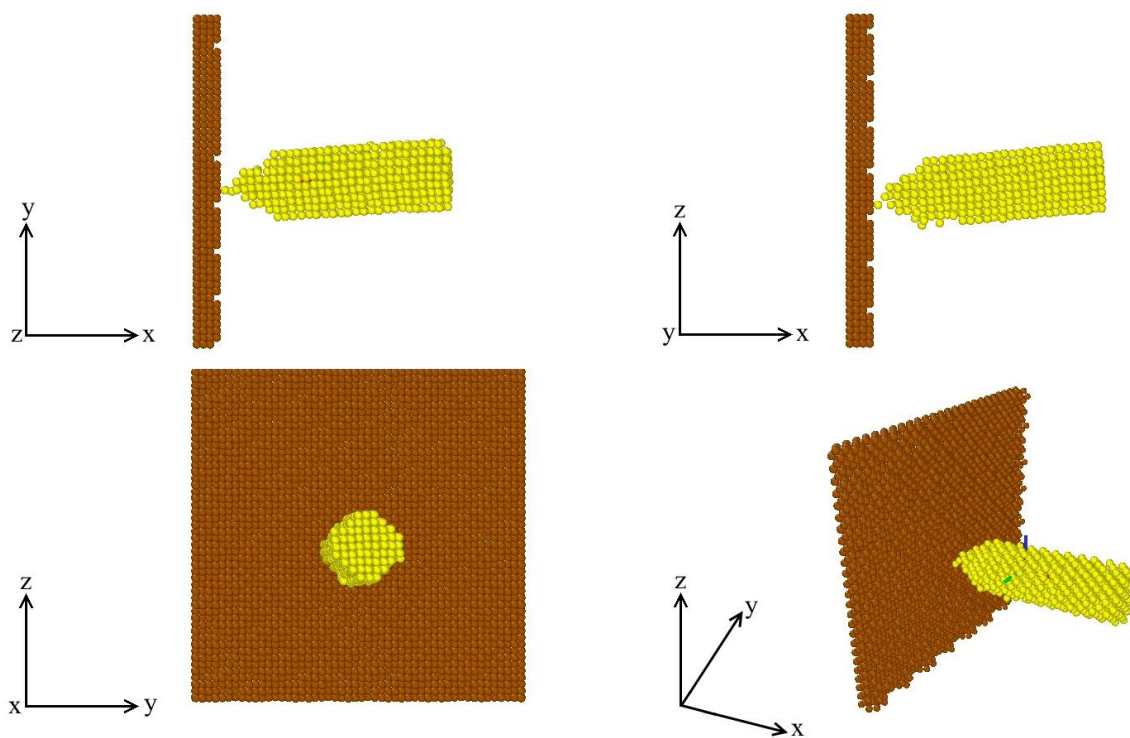


Рис. 4. Панорамные изображения разрушения зонда, тип подложки «зерно», расстояние 0,05 нм.

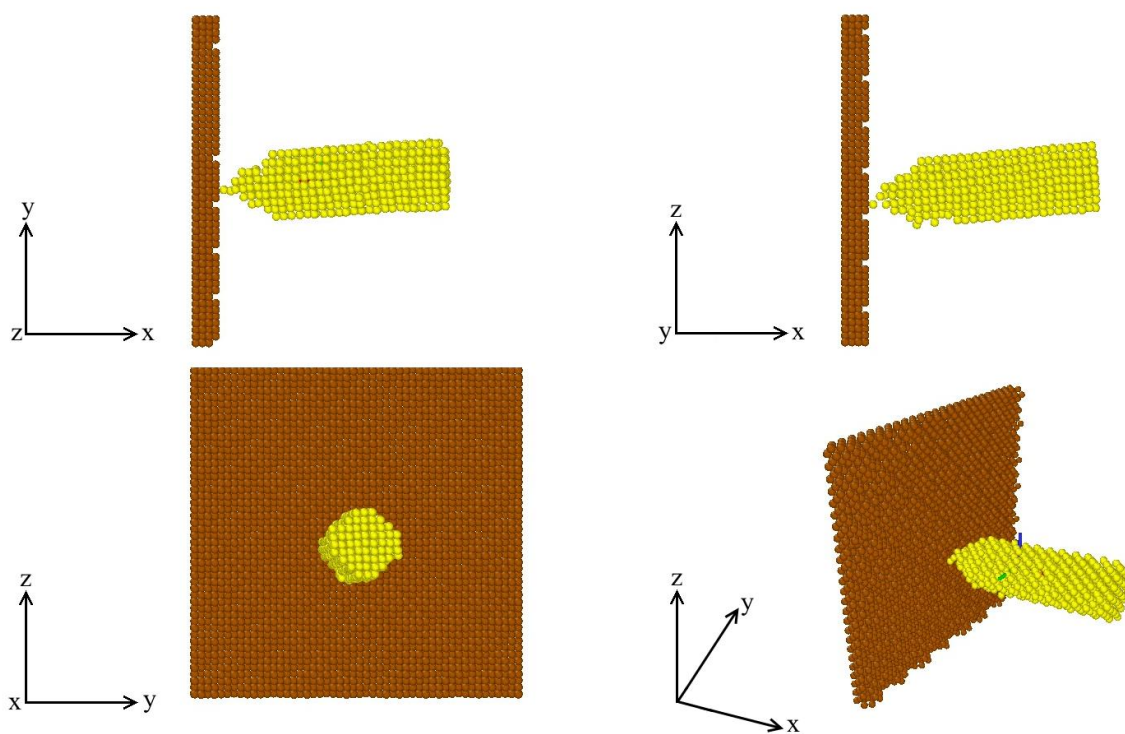


Рис. 5. Панорамные изображения физического контакта в системе зонд (медь) – образец (золото), тип подложки «зерно», расстояние 0,2 нм.

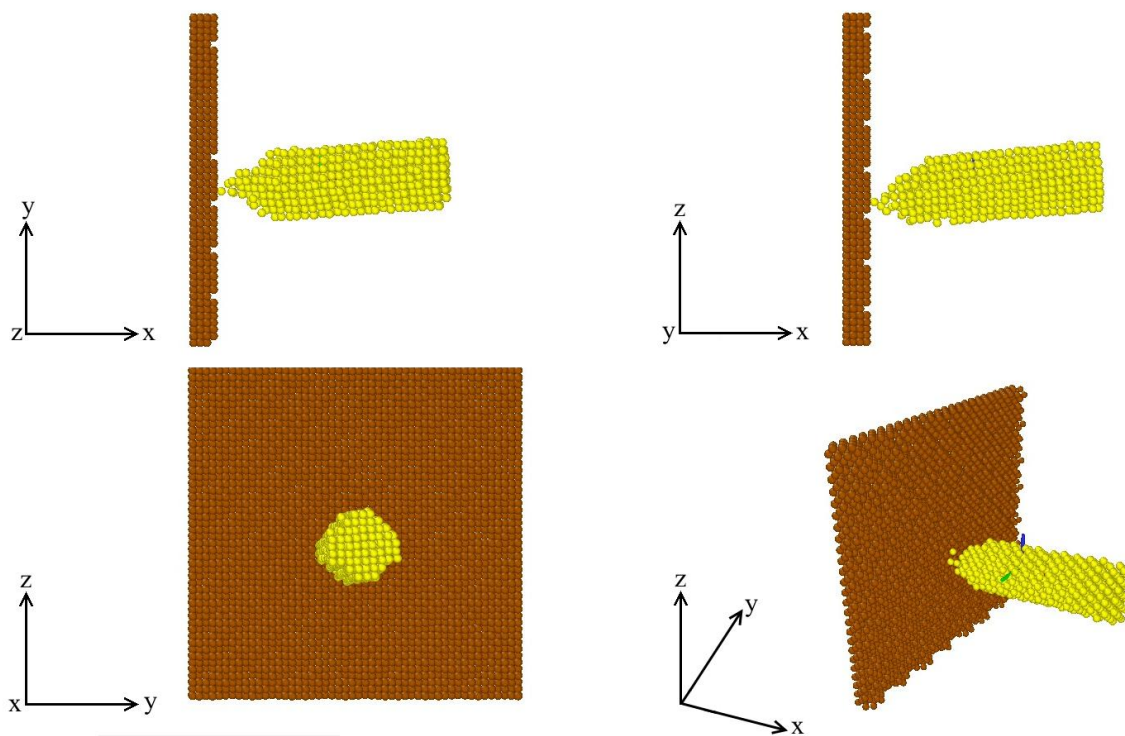


Рис. 6. Панорамные изображения разрушения зонда, тип подложки «зерно», расстояние 0,2 нм.

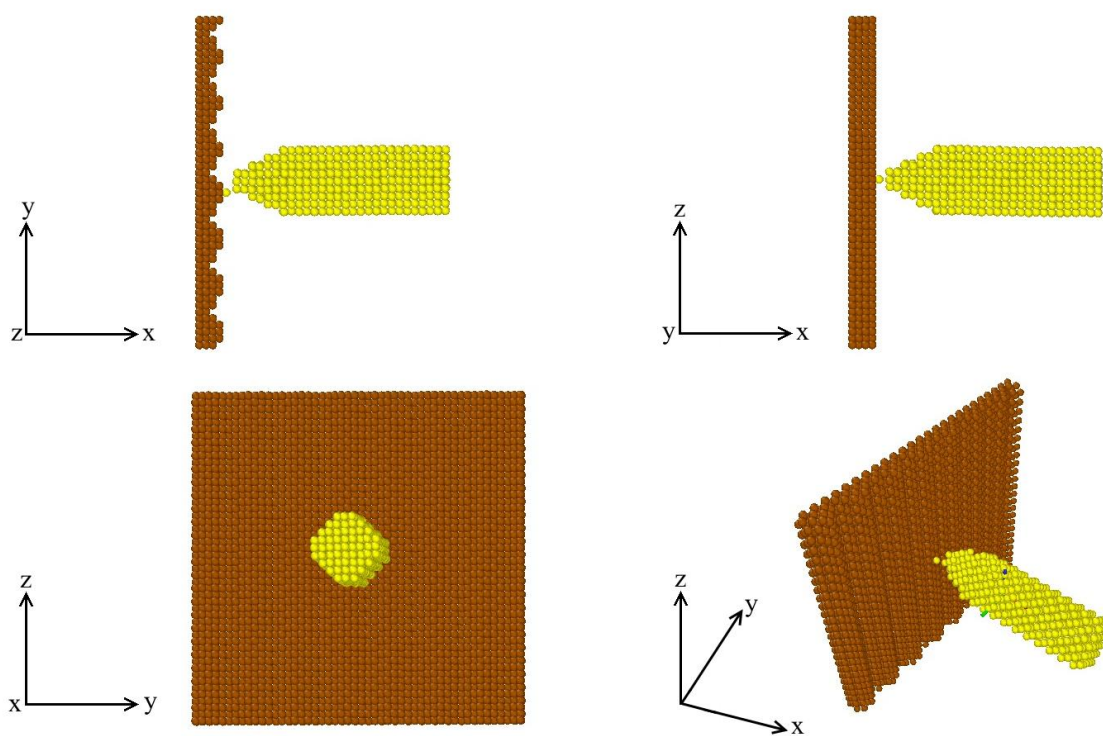


Рис. 7. Панорамные изображения физического контакта в системе зонд (медь) – образец (золото), тип подложки «волна», расстояние 0,05 нм.

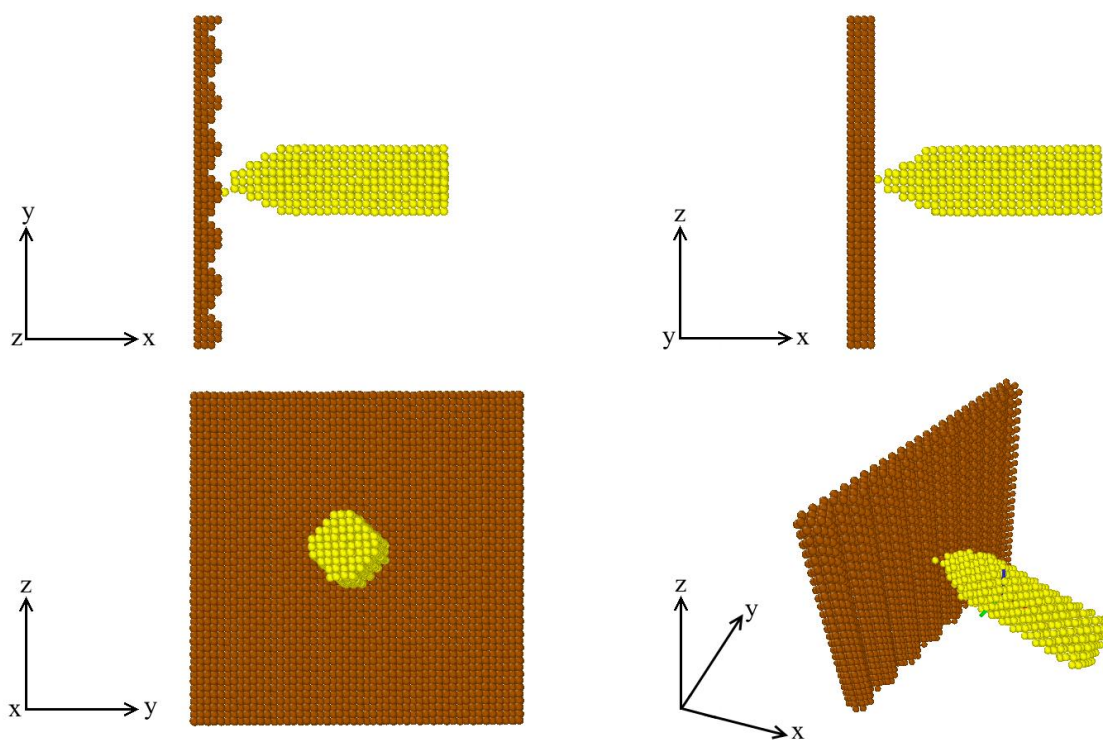


Рис. 8. Панорамные изображения разрушения зонда, тип подложки «волна», расстояние 0,05 нм.

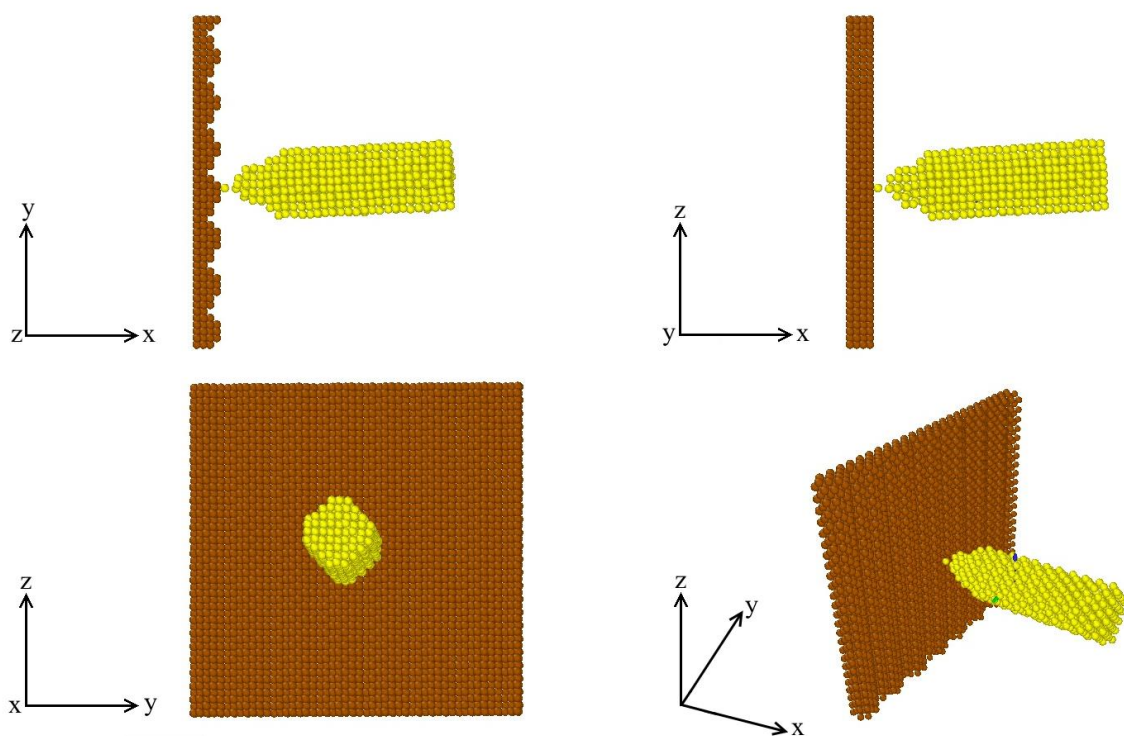


Рис. 9. Панорамные изображения физического контакта в системе зонд (медь) – образец (золото), тип подложки «волна», расстояние 0,2 нм.

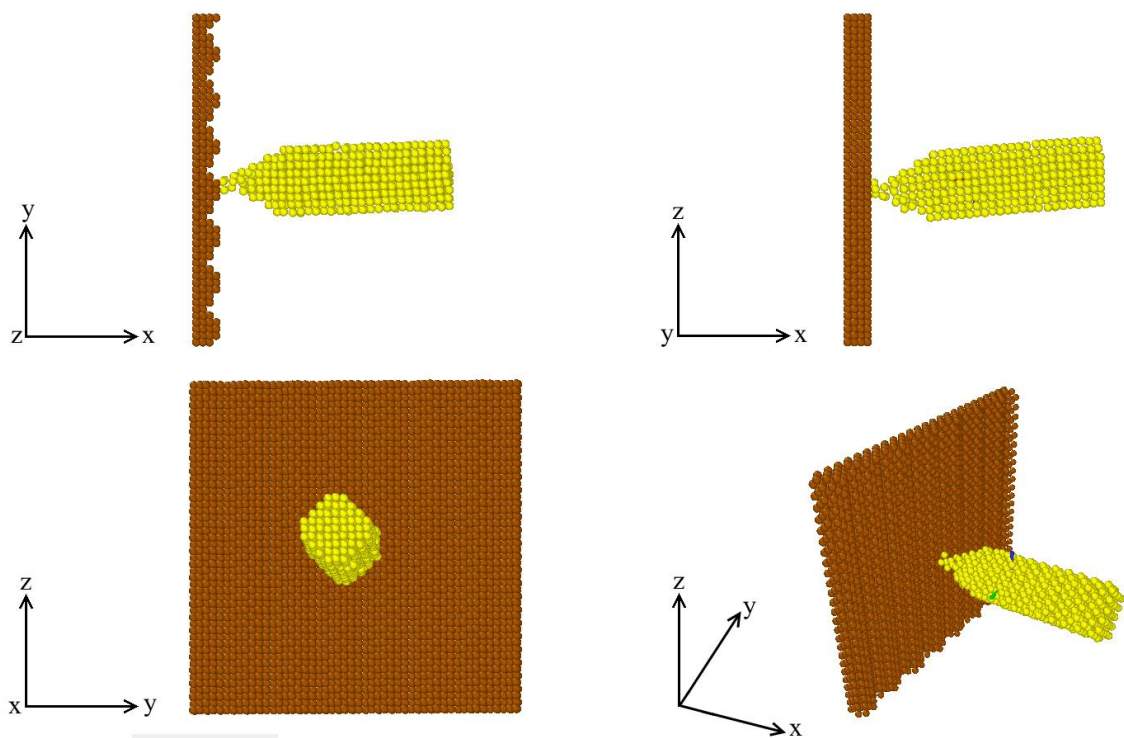


Рис. 10. Панорамные изображения разрушения зонда, тип подложки «волна», расстояние 0,2 нм.

Нами фиксировались три возможных ситуации в результате моделирования: 1) подвод и начало эксперимента, 2) физический контакт между образцом и зондом, с частичным массопереносом и без него, 3) разрушение структуры зонда (изменение геометрических параметров острия, огрубление формы острия, наклон острия). Вероятность протекания второго этапа резко уменьшается даже при незначительном увеличении расстояния между образцом и зондом. При этом, как будет установлено далее, последовательность второго и третьего этапов может также нарушаться.

Дальнейшее развитие методов компьютерной визуализации и интерпретации рассматриваемых процессов структурообразования в металлических пленках позволит при анализе реальных экспериментальных данных, получаемых, например, с использованием СТМ, прогнозировать и исключать возможность искажения визуальной картины поверхности образца, особенность его рельефа, а также фиксировать и контролировать изменение параметров проводимости между образцом и зондом по сравнению со штатными параметрами функционирования (комнатная температура в зоне проведения эксперимента).

В Таблице 1 представлены результаты по температурам, соответствующим выше отмеченным этапам физического контакта и разрушения острия для типов подложки «зерно» и «волна». Отметим, что для типа подложки «зерно» диапазон температур  $\Delta T = T_d - T_c$  с увеличением расстояния между острием зонда и образцом сначала увеличивается, а потом резко сокращается, что свидетельствует о том, что при отсутствии необходимого контакта для формирования качественного СТМ изображения при долговременном использовании острия происходит его огрубление и дальнейшее его использование является не только нецелесообразным, но и вредным, поскольку может способствовать получению изображений, содержащих артефакты или размерные несоответствия. Сравнивая значения, представленные в Таблице 1, можно сделать вывод о том, что более развитый рельеф (тип «зерно») в большей степени позволяет получать «усредненные» результаты, в то время как для менее развитого рельефа (тип «волна») выше вероятность наблюдения экстремальных особенностей поведения острия зонда при взаимодействии с образцом (более широкий температурный интервал  $\Delta T$ , особенно при малых расстояниях между острием и образцом, достаточно сильное изменение структуры острия при термическом расширении без физического контакта между острием зонда и поверхностью образца). Кроме того, при  $d = 0,1$  нм нами фиксировалась отличная от всех других конфигураций ситуация, когда стадии разрушения острия (наклон,

огрубление острия и уширение его основания) происходили до стадии физического контакта острия зонда и образца.

В определенном смысле в характере взаимодействия острия зонда и поверхности образца могут проявляться особенности коалесценции наноразмерных кластеров, т.е. формирования контакта – манжеты [18] между острием зонда и образцом. Физические свойства таких контактов определяются не только геометрическими размерами наносистемы, взаимным расположением, но и их термодинамическими свойствами, в частности, межфазное натяжение и соответствующий размерный эффект могут играть в данном случае решающее значение [19].

Таблица 1. Температуры физического контакта острия зонда и образца  $T_c$  и разрушения острия зонда  $T_d$  для различных значений расстояния  $d$  между ними в начальной конфигурации для различных типов подложки

Тип «зерно»							
$d = 0,05$ нм		$d = 0,1$ нм		$d = 0,15$ нм		$d = 0,2$ нм	
$T_c, K$	$T_d, K$	$T_c, K$	$T_d, K$	$T_c, K$	$T_d, K$	$T_c, K$	$T_d, K$
498	556	528	616	703	762	762	791
Тип «волна»							
$d = 0,05$ нм		$d = 0,1$ нм		$d = 0,15$ нм		$d = 0,2$ нм	
$T_c, K$	$T_d, K$	$T_c, K$	$T_d, K$	$T_c, K$	$T_d, K$	$T_c, K$	$T_d, K$
440	557	-	664	664	732	732	762

Особый интерес представляет изучение изменения структуры острия от момента начала моделирования эксперимента до температуры физического контакта острия зонда и образца  $T_c$ . В этой температурной области структура острия может существенно повлиять на получаемые вольт-амперные характеристики туннельного контакта зонд – образец. Очевидно, что для измерения вольт-амперных характеристик неприемлемо наличие механического контакта между образцом и острием или даже частичный перенос вещества острия. Установлено, что при одинаковой структуре острия в начале моделирования структура поверхности может оказывать влияние как на скорость (температурный интервал) формирования контакта между острием зонда и образцом, так и структуру острия непосредственно около контактной области, а также в области перехода формы острия от цилиндра к конусу (граница между данными областями в моделируемой системе представляла собой ОЦК структуру). Для типа поверхности «волна» при моделировании происходило разрушение переходной области и формирование за счет этих атомов как ГЦК структуры, так и ГПУ структуры в центральной части конусообразного острия зонда. При этом для более развитого рельефа

поверхности (тип «зерно») полное разрушение переходной ОЦК области не происходило, но при этом нами также фиксировались зоны формирования ГПУ структур, в том числе за счет атомов ГЦК структуры в центральной части конусообразного острия зонда. Установленные в процессе моделирования количественные характеристики, описывающие динамику изменения структурного состава острия, должны учитываться при определении энергетических характеристик туннельного контакта зонд – образец (плотность состояний в энергетическом спектре образца).

#### **4. Заключение**

К настоящему времени метод СТМ, в первую очередь, используется как эффективное средство для изучения морфологических характеристик поверхности пленочных структур и материалов, а также позволяет исследовать их физические, химические, биологические и другие свойства с пространственным разрешением вплоть до единиц нанометров (а в некоторых случаях до единиц ангстрем). Таким образом, условия эксплуатации, в частности физические характеристики острия (размер и структура, коэффициент теплового расширения, проводимость) могут существенно влиять на разрешающую способность СТМ и качество получаемой визуализации поверхности образца. В этой связи, изучение условий штатного функционирования СТМ путем моделирования взаимодействия зонда СТМ и образца является важной задачей в целях разработки рекомендаций по технологическому использованию СТМ для применения к конкретным задачам в физике и химии поверхности на атомном уровне, изучения трибологических свойств поверхности, а также может быть критически важным при исследовании биологических структур. Возможность выхода из строя зонда СТМ, приводящее к искажению визуальной картины поверхности образца и изменения параметров проводимости между образцом и зондом, существенно ограничивает применение СТМ для изучения больших площадей образца с высоким разрешением. Исходя из вышеизложенного, можно с уверенностью утверждать, что результаты моделирования процесса взаимодействия зонда СТМ с поверхностью образца будут способствовать получению точной измерительной информации о геометрических параметрах поверхности образца и электрических характеристиках наноструктур и острия, что находит важное практическое применение при изучении, например, фрактальных структур, обладающих принципиально новыми физико-химическими свойствами [20-25].

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-33-00742 и № 17-53-04010 Бел\_мол\_а) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X17PM-032).*

### Библиографический список:

1. **Чайка, А.Н.** Использование монокристаллического вольфрама для создания высокоразрешающих зондов СТМ с контролируемой структурой / А.Н. Чайка, С.С. Назин, В.Н. Семенов и др. // *Металлы*. – 2011. – № 4. – С. 3-10.
2. **Корнилов, О.А.** Изучение влияния формы туннельного барьера на туннельный ток в СТМ / О.А. Корнилов, Г.Г. Владимиров // *Тезисы ВНКСФ-7*. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2001. – С. 187.
3. **Карташев, В.А.** Влияние особенностей работы системы управления туннельного микроскопа на точность измерений / В.А. Карташев, В.В. Карташев // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2014. – № 1. – С. 130-136.
4. **Карташев, В.В.** Определение формы и размера острия иглы туннельного микроскопа / В.В. Карташев, В.А. Карташев // *Нано- и микросистемная техника*. – 2010. – № 10. – С. 7-10.
5. **Карташев, В.А.** Учет геометрии острия иглы для коррекции измерений туннельного микроскопа / В.А. Карташев, В.В. Карташев // *Нано- и микросистемная техника*. – 2013. – № 11. – С. 2-4.
6. **Карташев, В.А.** Туннельный микроскоп как система технического зрения для визуализации нанорельефа поверхности / В.А. Карташев, В.В. Карташев // *Механика, управление и информатика*. – 2012. – № 8. – С. 174-178.
7. **Карташев, В.А.** Влияние колебаний основания туннельного микроскопа на отклонения от программного движения зонда / В.А. Карташев, В.В. Карташев // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2008. – № 4. – С. 159-164
8. **Соколов, Д.Н.** О моделировании термических эффектов при взаимодействии зонда сканирующего туннельного микроскопа с образцом / Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков, П.С. Кутилин и др. // *Нанотехника*. – 2013. – № 2 (34). – С. 78-80.
9. **Соколов, Д.Н.** Моделирование взаимодействия зонда сканирующего туннельного микроскопа с поверхностью образца со сложным рельефом / Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов и др. // *Седьмая международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», 2-5 октября 2017, Москва: тезисы докладов*. – М.: НИТУ «МИСиС», 2017. – С. 191.
10. **Сдобняков, Н.Ю.** Измерение вольт–амперных характеристик туннельного контакта вольфрам–золото / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Т.Ю. Зыков и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова*. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2011. Вып. 3. – С. 206-216.
11. **Sheu, J.K.** High–transparency *Ni/Au* ohmic contact to p-type *GaN* / J.K. Sheu, Y.K. Su, G.C. Chi et al. // *Applied Physics Letters*. – 1999. – V. 74. – I. 16. – P. 2340-2342.
12. **Ho, J.K.** Low–resistance ohmic contacts to p-type *GaN* achieved by the oxidation of *Ni/Au* films / J.K. Ho, C.-S. Jong, C. C. Chiu et al. // *Applied Physics Letters*. – 1999. – V. 86. – I. 9. – P. 4491-4497.
13. **Bendavid, A.** Morphology and optical properties of gold thin film prepared by filtered arc deposition / A. Bendavid, P.J. Martin, L. Wiczorek // *Thin Solid Films*. – 1999. – V. 354. – P. 169-175.
14. **Стогний, А.И.** Получение методом ионно–лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота / А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, С.Д. Тушина и др. // *Журнал технической физики*. – 2003. – Т. 73. – Вып. 6. – С. 86-89.

15. **Gupta, R.P.** Lattice relaxation at a metal surface / R.P. Gupta // *Physical Review B*. – 1981. – V. 23. – I. 12. – P. 6265-6270.
16. **Metropolis, N.** Equation of state calculations by fast computing machines / N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.N. Teller, E. Teller // *Journal of Chemical Physics*. – 1953. – V. 21. – I. 16. – P. 1087-1092.
17. **Stukowski, A.** Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO - the open visualization tool / A. Stukowski // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2010. – V. 18. – V. 1. – P. 015012-1-015012-7.
18. **Колосов, А.Ю.** Моделирование процесса коалесценции наночастиц золота методом Монте-Карло / А.Ю. Колосов, Н.Ю. Сдобняков, П.В. Комаров, Н.В. Новожилов, В.А. Хашин, Д.Н. Соколов // *Нанотехника*. – 2013. – № 2 (34). – С. 65-71.
19. **Bazulev, A.N.** Thermodynamic perturbation theory calculations of interphase tension in small objects / A.N. Bazulev, V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. – 2002. – V. 76. – № 11. – P. 1872-1876.
20. **Карпов, С.В.** Оптические и фотофизические свойства фрактально-структурных золей металлов / С.В. Карпов, В.В. Слабко. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – 264 с.
21. **Pramanik, B.** Surface fractal analysis for estimating the fracture energy absorption of nanoparticle reinforced composites / B. Pramanik, T. Tadepalli, P.R. Mantena // *Materials*. – 2012. – V. 5. – I. 5. – P. 922-926.
22. **Ковальчук, М.В.** Конструктивные фракталы в моделях пространственного распределения наночастиц / М.В. Ковальчук, П.В. Короленко, Ю.В. Рыжикова // *Ученые записки физического факультета МГУ*. – 2015. – № 1. – С. 151401-1-151401-5.
23. **Сдобняков, Н.Ю.** Определение фрактальной размерности островковых плёнок золота на слюде / Н.Ю. Сдобняков, Т.Ю. Зыков, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Физика»*. – 2009. – № 41. – Вып. 6. – С. 112-119.
24. **Зыков, Т.Ю.** Исследование морфологии рельефа поверхности золота на слюде методом сканирующей туннельной микроскопии / Т.Ю. Зыков, Н.Ю. Сдобняков, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова*. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2009. – Вып. 1. – С. 34-41.
25. **Зыков, Т.Ю.** Исследование морфологии рельефа поверхности золота на слюде методом сканирующей туннельной микроскопии / Т.Ю. Зыков, Н.Ю. Сдобняков, В.М. Самсонов, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2009. – Т. 11. – № 4. – С. 309-313.