

На правах рукописи



**Алероев Муслим Ахметханович**

**Исследование влияния внешних воздействий на поверхностные характеристики  
легкоплавких металлов и сплавов**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нальчик – 2020

Работа выполнена в Кабардино-Балкарском государственном университете им. Х.М. Бербекова на кафедре электроники и информационных технологий

**Научный руководитель:**

**Ашхотов Олег Газизович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».

**Официальные оппоненты:**

**Павленко Анатолий Владимирович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией наноразмерных активных сред и материалов ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук».

**Элимханов Джабраил Зайндиевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет».

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», Ростовская обл., г. Новочеркасск.

Защита диссертации состоится «15» декабря 2020 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.076.02 при ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» по адресу: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» и на сайте <http://diser.kbsu.ru>.

Автореферат разослан «09» октября 2020 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.076.02  
д.ф.-м.н., профессор



Ахкубеков Анатолий Амишевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Важной задачей физики и химии поверхности металлов является установление физико-химических закономерностей образования адсорбционных слоев на их поверхностях. Подобные системы интересны как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Значимость таких систем актуальна в плане их использования в качестве материалов микро- и наноэлектроники. В этом случае для получения тонких пленок используют внешнее воздействие – фотонное, электронное, ионное, термическое. Для решения проблем, связанных с формированием покрытий, представляется необходимым проведение исследований с использованием современных методов анализа поверхности, в которых в качестве зондов чаще других используются электроны, ионы и фотоны.

**Степень разработанности темы исследования.** Несмотря на усилия, предпринятые учеными в последние годы, многие проблемы остаются открытыми. Например, остаются открытыми вопросы, касающиеся выяснения механизмов формирования оксидных покрытий при воздействии на поверхность заряженными частицами. Помимо этого, исследования, как правило, не носят систематического характера. Этому препятствует отсутствие одинаковых экспериментальных условий при проведении исследований в разных лабораториях.

**Цель и задачи исследования.** В данной диссертационной работе целью является изучение влияния внешних воздействий на поверхностные характеристики некоторых легкоплавких металлов. Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Анализ методов исследования поверхностных характеристик твердых и жидких металлов и выбор наиболее подходящих для изучения влияния заряженных частиц и окружающей среды на состояние поверхности, а также изучение литературных данных по поверхностным характеристикам в различных агрегатных состояниях.

2. Разработка и реализация аппаратных и программных средств для автоматизации электронного спектрометра поверхности, а именно для регистрации тока вторично-эмитированных электронов с использованием цифрового синхронного детектирования, схем делителя опорной частоты и формирователя импульсов модуляции.

3. Исследование кинетики адсорбции кислорода на поверхности поликристаллических индия, таллия, серебра при различных воздействиях кислородом.

4. Исследование поверхностных характеристик таллия, висмута, натрия и калия, и их бинарных сплавов в различных фазовых состояниях.

### **Научная новизна результатов исследования:**

1. Исследовано образование окисного слоя в приповерхностных слоях поликристаллического серебра.

2. Изучена кинетика адсорбции кислорода в разных состояниях на поверхности индия при различных экспозициях атомарного и молекулярного кислорода.

3. Предложен способ получения атомарно-чистой поверхности химически активных металлов.

4. В одинаковых экспериментальных условиях *in situ* исследованы поверхностные характеристики таллия, висмута, калия, натрия и их бинарных сплавов в различных фазовых состояниях.

### **Теоретическая и практическая значимость:**

Полученные результаты по изучению влияния заряженных частиц на поверхностные характеристики металлов – индий, серебро, калий, натрий, таллий и висмут могут найти применение у специалистов, занимающихся экспериментальными исследованиями поверхностных свойств твердых и жидких тел в области наноэлектроники при разработке методов получения полупроводниковых и диэлектрических покрытий.

**Методология и методы исследования.** Основными методами исследования в диссертационной работе являлись электронная оже-спектроскопия (ЭОС), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) K-Alpha и метод «большой» капли.

### **Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Схемы для регистрации вторично-эмитированных электронов с использованием цифрового синхронного детектирования, опорной частоты, формирователя импульсов модуляции и интерфейсной платы для управления преобразователем В1-13.

2. Устройства и методики загрузки, приготовления сплавов, получения атомарно-чистой поверхности изученных металлов и измерения поверхностного натяжения и поверхностной концентрации химически активных металлов.

3. Экспонирование образца поликристаллического индия в среде кислорода при комнатной температуре приводит к образованию на поверхности слоистой структуры, состоящей из  $\text{In}_2\text{O}_3$ +нульвалентный In и слоя свободного кислорода, с толщиной, соизмеримой со средней длиной свободного пробега электронов Оже М-серии для индия.
4. Бомбардировка поверхности индия ионами кислорода (100-300 эВ) приводит к сдвигу ожепиков In  $\text{M}_{\text{IV},\text{V}}\text{N}_{4,5}\text{N}_{4,5}$  в сторону меньших энергий на 4.4 эВ при том, что энергия связи на 3d-уровне возрастает на 0.3 эВ.
5. Бомбардировка поверхности поликристаллического серебра моноэнергетическими (100-300 эВ) ионами кислорода приводит к формированию кластерных структур.
6. Выдержка массивных образцов поликристаллического серебра в парах воды при атмосферном давлении и  $T = 1073 \text{ K}$  приводит к образованию на поверхности слоя из молекулярного кислорода, а в приповерхностных слоях – оксида кислорода в октаэдрических пустотах.
7. Измеренные значения поверхностного натяжения изученных таллия, висмута, калия, натрия и их бинарных сплавов выше аналогичных величин других авторов.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объемом экспериментальных данных, полученных с применением современных аналитических методов.

**Личный вклад автора.** Цель и задачи диссертации были сформулированы и поставлены научным руководителем проф. Ашхотовым О.Г., который принимал участие в обсуждении выбора методов исследования и основных результатов работы. Экспериментальные измерения, обработка и интерпретация результатов выполнены диссертантом.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы были апробированы на следующих симпозиумах и конференциях:

1. Всероссийская научно-практическая конференция «Школа, вуз: Современные проблемы математики, информатики и физики» (Грозный, 2013).
2. XV Всероссийская школа–семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества «СПФКС-15» (Екатеринбург, 2014).
3. XII российский симпозиум «Атомистическое моделирование, теория и эксперимент» (Новый Афон, 2015).
4. Коллективная монография «Актуальные проблемы современного материаловедения» (Грозный, 2015).
5. Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в XXI веке». (Тамбов, 2016)
6. Международный междисциплинарный симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (Нальчик-Ростов-на-Дону-Грозный-пос. Южный, 2017)
7. Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные системы и микросистемная техника». (Москва, 2018, 2019).
8. Международная научно-практическая конференция «Закономерности развития современного естествознания, техники и технологий» (Белгород, 2018).
9. Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы образования и науки» (Тамбов, 2018).
10. Международный междисциплинарный симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (Нальчик-Ростов-на - Дону-Грозный-Шепси, 2018).

**Публикации.** По теме диссертационной работе с участием автора опубликованы 25 научных работ, из которых 12 – статьи, опубликованные рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ и 9 – опубликованы в журналах Scopus и Web of science.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на русском языке и состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка использованной литературы. Общий объем диссертации 132 страницы, 53 рисунка, 11 таблиц.

**Во введении** дается обоснование актуальности темы, формулируются цель и задачи диссертационной работы, описывается научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены современные методы исследования поверхности металлов, проанализированы результаты экспериментальных исследований адсорбции кислорода на поверхности серебра, поверхностные состояния индия, возникающие при контакте с кислородом, а также поверхностные характеристики щелочных металлов.

**В второй главе** описываются методы исследования, экспериментальные установки, а также методики подготовки и исследования образцов. Рассмотрены проблемы, возникающие при получении атомарно-чистой поверхности химически активных металлов. Приводится подробная информация о разработанных автором аппаратных и программных средствах для автоматизации электронного спектрометра поверхности, которые предназначены для регистрации тока вторично-эмиттированных электронов с использованием цифрового синхронного детектирования. Рассмотрены схемы делителя опорной частоты и формирователя импульсов модуляции с прецизионной установкой частоты, ключевого синхронного детектора.

**В третьей главе** представлены экспериментальные результаты исследования процессов адсорбции и образования оксидных слоев на поверхности индия, таллия, серебра. Также обсуждаются поверхностные характеристики чистых таллия, висмута, натрия и калия, и их бинарных сплавов Na-K и Tl-Vi в различных фазовых состояниях.

Так как в ЭОС используется электронный зонд, то вначале было изучено его влияние на процессы, происходящие на поверхности. Было установлено, например, что для таллия наблюдается значительное возрастание концентрации кислорода на поверхности вследствие электронно-стимулированной адсорбции (рисунок 1), обусловленное влиянием кислорода из остаточной среды. По этой причине в экспериментах при регистрации оже-спектров строго контролировался состав остаточного газа.

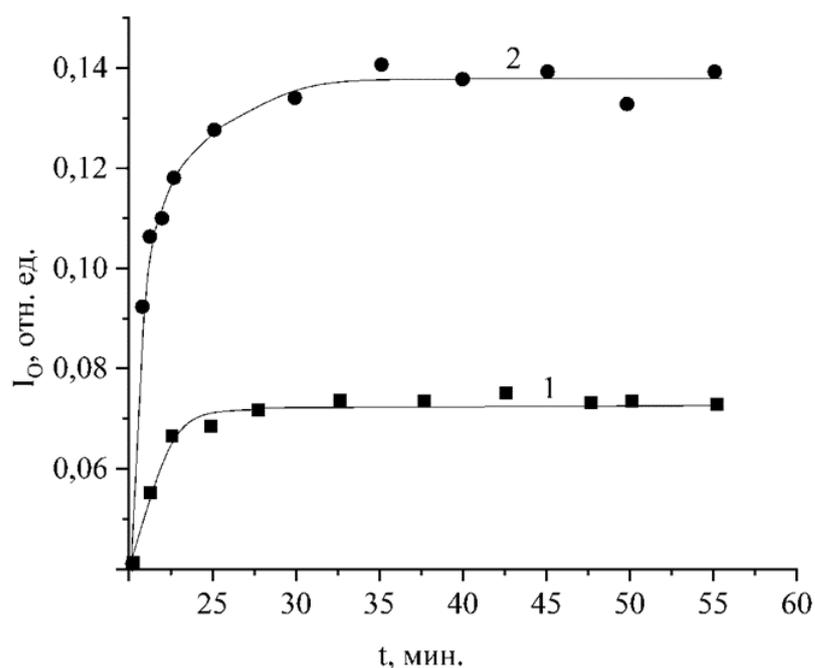


Рисунок 1 - Приведенные интенсивности (кривые 1, 2) оже-пиков кислорода ( $KL_1$ ,  $L_{2,3} - 503$  эВ) в зависимости от экспозиции в кислороде: кривая 1 – без электронной стимуляции; кривая 2 – при стимуляции адсорбции электронами с  $E=800$  эВ,  $80$  мкА.

Развитие гибкой электроники и гетерогенного катализа показало, что процессы взаимодействия кислорода с серебром являются актуальными и поэтому требуют детального изучения. Известны два способа окисления серебра при низкой температуре – кислородом, активированным в газоразрядной плазме, и атомарным кислородом, полученном различными способами. В литературе описаны практически все способы получения атомарного кислорода, кроме одного – в водяной паровой фазе при высоких температурах, близких к  $T_{пл.}$  серебра. По этой

причине в настоящей работе были выполнены эксперименты по изучению окисления поликристаллического серебра после внешнего воздействия.

Вначале под таким воздействием понималась выдержка образца в водяной паровой фазе. После получения атомарно-чистой поверхности образец выдерживался в течение 2 час. в паровой фазе при 1073 К с последующим анализом указанными методами и ионным профилированием ( $\text{Ar}^+$ ,  $E=500$  эВ,  $25$  мкА/см<sup>2</sup>, скорость травления  $0.2$  нм/с). По данным ЭОС- и РФЭС-анализа были построены профили распределения компонентов по глубине, из которых следует, что кислород присутствовал не только на самой поверхности, но наблюдался по глубине до  $8$  нм. На спектре, полученном с поверхности образца, присутствовал пик кислорода  $1s$  с максимумом около  $531.1$  эВ (рисунок 2, кривая 1). Его полуширина на половине высоты (ПШПВ), равная  $2.0$  эВ, дает основание считать, что он может состоять из нескольких компонент. Эта область спектра характерна для молекулярных форм кислорода. Следует отметить, что кислород в составе карбонатных, гидроксидных структур и в составе адсорбированной воды также характеризуется пиками в этой области. Присутствие ОН-групп и воды в нашем случае не исключено, однако вклад этих состояний должен быть незначительным, так как образец и камера, в которой проводились эксперименты многократно отжигалась. На спектрах присутствовал пик  $O\ 1s$  уже с ПШПВ= $1.5$  эВ (рисунок 2, кривая 2), имеющий максимум около  $530.3$  эВ, который типичен для атомарного кислорода в составе  $\text{Ag}_2\text{O}$ .

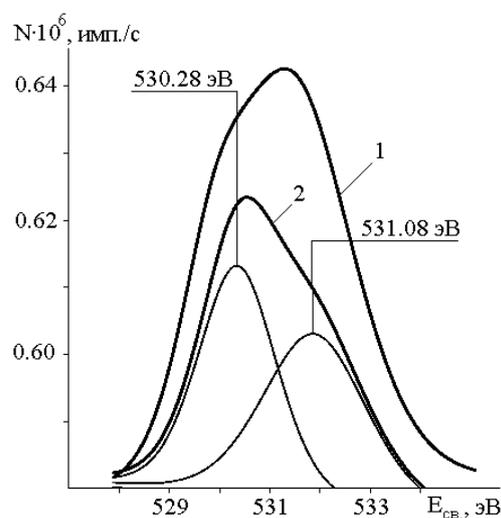


Рисунок 2. Профиль пика  $1s$  O с поверхности Ag после выдержки в течение 2 час. в паровой фазе при  $1073$  К (1) и через  $20$  с ионного травления (2).

Чтобы выяснить, что присутствует на поверхности образца -ОН-группы или молекулярный кислород мы исключили воздействие водой, оставив только атомарный кислород. Для этого образец бомбардировался ионами кислорода с энергиями  $100$ - $300$  эВ ( $5$  мкА/см<sup>2</sup>) в течение 2 часов с последующей регистрацией оже- и РФЭС-спектров, после которой были идентифицированы три различных состояния кислорода (рисунок 3а), в соответствии с положениями пиков  $O\ 1s$  при энергиях связи  $532.2$  эВ,  $530.5$  эВ и  $529.8$  эВ. Причины появления пиков  $O\ 1s$  описаны в литературе и привязаны к различным компонентам. В интервале энергий от  $531$  эВ до  $532$  эВ наблюдаются фотоэлектроны молекулярного кислорода, поэтому пик  $532.2$  эВ мы отнесли к молекулярному кислороду. Пик с энергией  $530.5$  эВ можно отнести к атомарному кислороду на поверхности и в приповерхностных слоях, а при энергии  $529.8$  эВ – к оксиду  $\text{Ag}_2\text{O}$ .

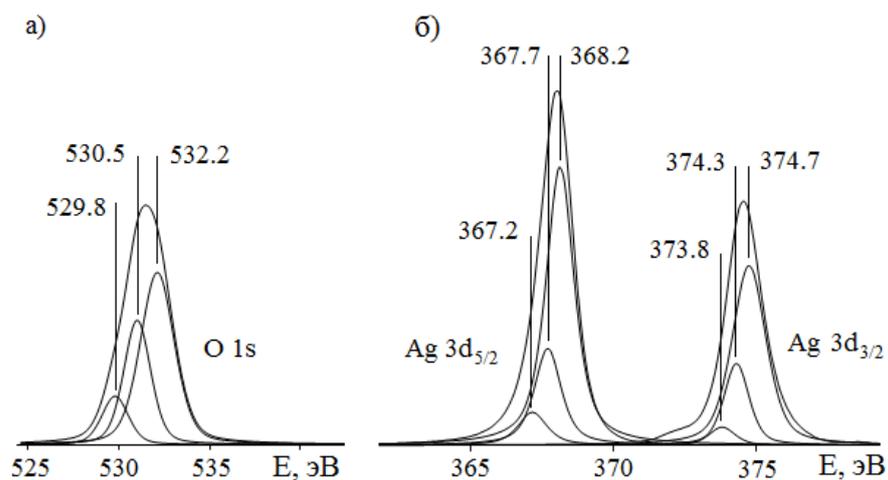


Рисунок 3. Спектры O 1s (а) и Ag 3d (б) с компонентным разложением, полученные после бомбардировки поверхности серебра ионами кислорода (100 эВ, 5 мкА/см<sup>2</sup>) в течение 2 час.

На спектрах серебра (рисунок 3б) для Ag 3d<sub>5/2</sub> также можно выделить три пика с энергиями связи E<sub>св.</sub> = 367.2 эВ, E<sub>св.</sub> = 367.7 эВ и 368.2 эВ. В соответствии с литературными данными пик с меньшим значением энергии связи был отнесен к серебру в составе оксида AgO. Второй пик можно приписать к Ag<sub>2</sub>O, а положение третьего пика соответствует нуль-валентному состоянию серебра.

Эффект обработки серебра ионами кислорода проявлялся также в сдвиге пика Ag 3d<sub>3/2</sub> в сторону больших энергий на 0.5 эВ, при неизменном энергетическом положении Ag 3d<sub>5/2</sub>, что свидетельствует об увеличении спин-орбитального расщепления для Ag 3d<sub>5/2</sub>-Ag 3d<sub>3/2</sub> (рисунок 4).

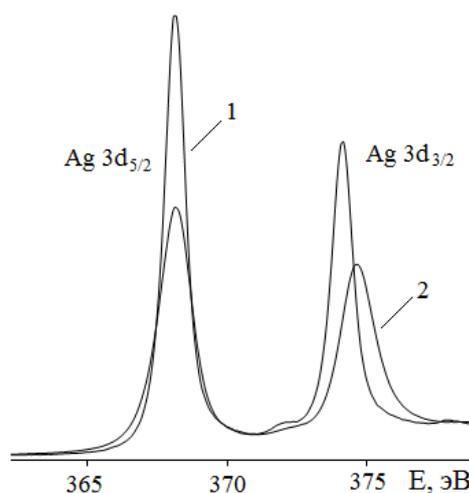


Рисунок 4. Спектры Ag 3d, полученные для атомарно-чистой поверхности серебра (1) и после обработки ее ионами кислорода (100 эВ, 5 мкА/см<sup>2</sup>) в течение 2 час. (2).

Таким образом, эксперименты показали, что после внешнего воздействия в анализируемых поверхностных слоях серебра присутствует атомарный кислород в составе AgO и Ag<sub>2</sub>O, молекулярный кислород, а также серебро в нуль-валентном состоянии. Из приведенных спектров видно, что амплитуды пиков, отнесенных к молекулярному кислороду и Ag<sup>0</sup>, преобладают над Ag-O. Подобные различия интенсивностей компонент спектров серебра и кислорода позволяют связать нуль-валентное состояние серебра с состояниями кислорода, характеризующимися энергиями связи 531-533 эВ, так как появление на спектре пиков с E<sub>O1s</sub> > 531 эВ указывает на возможность образования ассоциативных форм кислорода на серебре, т.е. структур Ag<sup>0</sup>-O<sub>x</sub>. Помимо этого, наблюдалось смещение пика Ag 3d<sub>3/2</sub> в сторону больших энергий на 0.5 эВ с

соответствующим увеличением спин-орбитального расщепления для  $Ag\ 3d_{5/2}-Ag\ 3d_{3/2}$ , не характерным для структур типа Ag-O.

Эксперименты показали, что начальная адсорбция кислорода на поверхность In не приводит к изменению формы и энергетического положения оже-пиков M-серии и пиков плазмонных потерь. Однако для последних наблюдается резкое уменьшение амплитуды (рисунок 5).

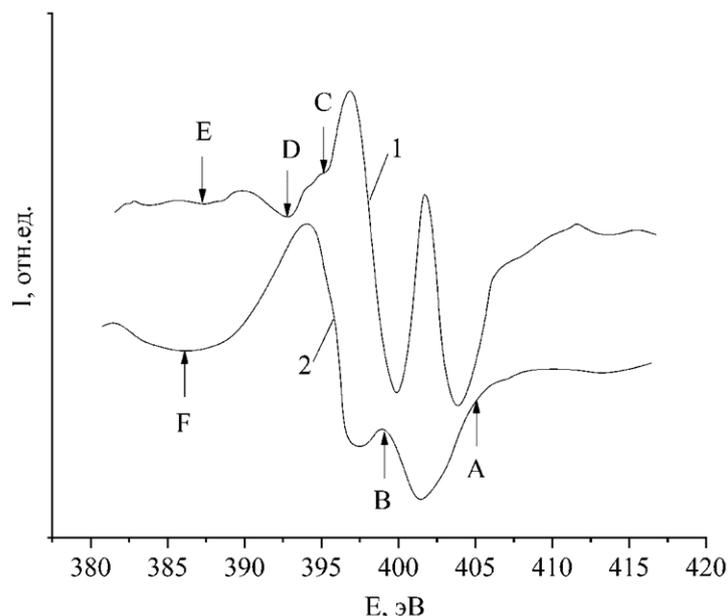


Рис. 5. Оже-спектры поверхности индия: 1 – атомарно-чистая поверхность, 2 – после экспозиции в среде кислорода (5000 L), Пик А –  $M_{V}N_{4,5}N_{4,5}$ , пик В –  $M_{IV}N_{4,5}N_{4,5}$ , С – поверхностный плазмон, D – объемный плазмон, E – двойной объемный плазмон.

Пик С, обусловленный появлением поверхностного плазмона, исчезает практически полностью при дозах кислорода 1-2 L, а пики E, D – при экспозициях кислорода 250 и 600 L соответственно (рисунок 6, кривые 1, 2).

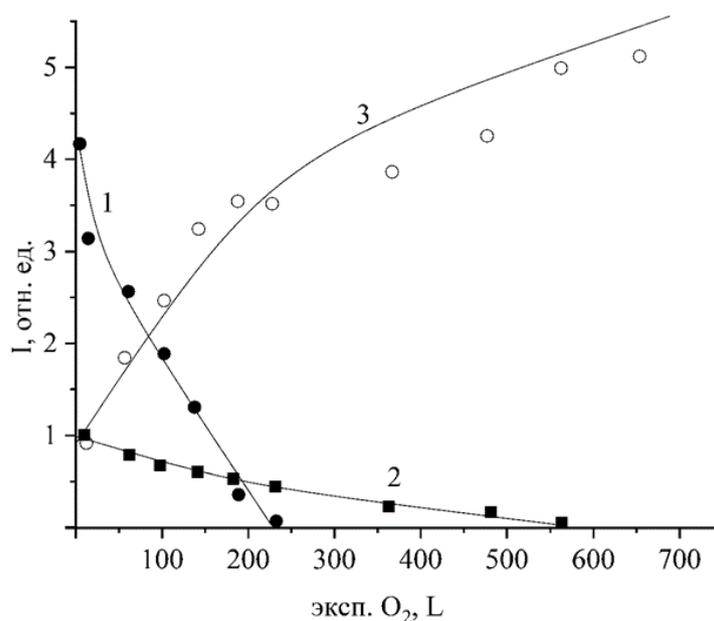


Рис. 6. Зависимости интенсивностей пиков объемных плазмонов (кривая 1 – пик E, кривая 2 – пик D) и оже-линии KLL кислорода (кривая 3) от времени экспозиции поверхности индия в среде кислорода (0-1000 L).

Одновременно на поверхности образца наблюдается монотонный рост концентрации кислорода (рисунок 6, кривая 3). Дальнейшая экспозиция в среде кислорода приводит к смещению по энергии оже-линий MNN на 4.4 эВ в сторону меньших энергий. И, начиная с экспозиции в 500 L (рисунок 7), на спектрах появляется широкий пик F, который, по-видимому, обусловлен суперпозицией плазменных потерь на In и In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, амплитуда которого вначале растет, а затем снижается, начиная с 3000 L.

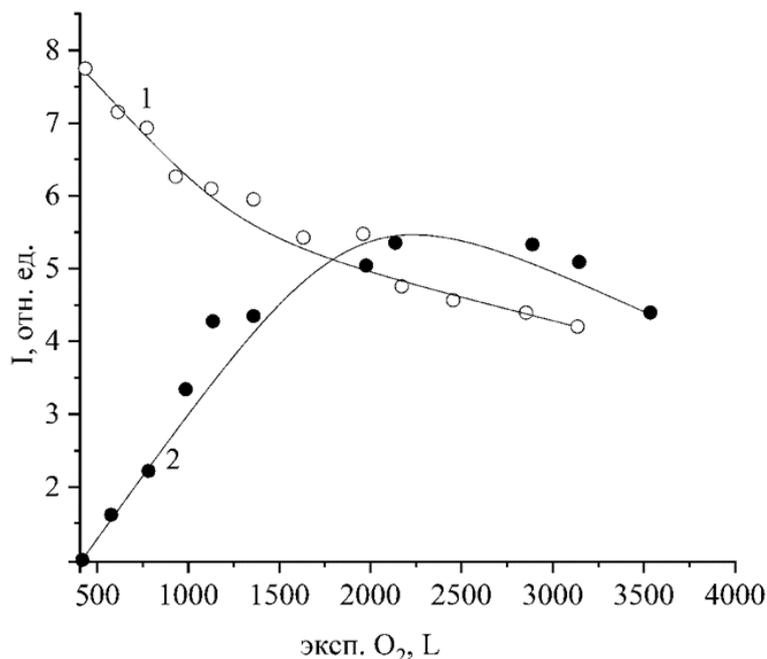


Рис. 7. Зависимости интенсивностей пиков индия M<sub>V</sub>N<sub>4,5</sub>N<sub>4,5</sub>, (кривая 1) и пика F (кривая 2) от времени экспозиции поверхности индия в среде кислорода (0-5000 L).

Полученные результаты не вызывают проблем в интерпретации. Действительно, кислород, как более электроотрицательный элемент, адсорбируясь на поверхность металла, будет заряжен отрицательно. Взаимодействуя с атомами на поверхности металла, он будет внедряться в приповерхностный слой. Очевидно, что характер и скорость процесса будет зависеть от величины теплоты испарения металла и энергии взаимодействия адатома с подложкой.

Уменьшение амплитуды пика F с экспозицией в среде кислорода, начиная с 3000 L, можно объяснить тем, что оксидный слой состоит из In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+In+O причем компоненты перемешаны не хаотически, а располагаются более или менее упорядоченно следующим образом: в начале слой In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+In, который завершается слоем адсорбированного кислорода. В этом случае уменьшение амплитуды пика плазменных потерь F на конечной стадии образования окисного слоя можно связать с появлением слоев химически несвязанного кислорода, толщина которого соизмерима со средней длиной свободного пробега MNN-электронов Оже In – 0.68 нм.

Похожие результаты были получены нами и при окислении индия в среде кислорода при атмосферном давлении и комнатной температуре. Исследование поверхности индия после бомбардировки ионами кислорода показало, что наблюдается смещение оже-пиков M<sub>IV</sub>, vN<sub>4,5</sub>N<sub>4,5</sub> в сторону меньших энергий на 4.4 эВ, в то время как энергия связи на 3d-уровне возрастает на 0.3 эВ. Указанные смещения соответствуют состоянию In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 1).

Таблица 1  
Значения энергии связи на уровнях 3d<sub>3/2</sub>, 3d<sub>5/2</sub>, оже-пика M<sub>IV</sub>N<sub>4,5</sub>N<sub>4,5</sub> и параметра Вагнера для разных состояний индия

Состояние	M <sub>IV</sub> N <sub>4,5</sub> N <sub>4,5</sub> , эВ	E, 3d <sub>3/2</sub> , эВ	E, 3d <sub>5/2</sub> , эВ	Параметр Вагнера, эВ
In	411.0	451.3	444.3	855.3

$\text{In}_2\text{O}_3$	406.6	452.2	444.7	851.3
$\text{In}(\text{OH})_3$	406.0	452.6	445.1	852.1
I	406.6	452.2	444.6	851.2
II	410.6	452.2	444.6	855.2

Обозначения: I – поверхность после бомбардировки ионами кислорода, II – на глубине 1 нм после бомбардировки ионами кислорода.

Отсюда следует, что атомы In на поверхности, подвергнутой воздействию ионами кислорода, после твердофазной реакции находились в химически связанном состоянии с кислородом. В пользу этого свидетельствуют рассчитанные значения параметра Вагнера (табл. 1) и результаты компонентного анализа 4d (рисунок 8, спектр 3), подтверждающие наличие на поверхности оксида индия.

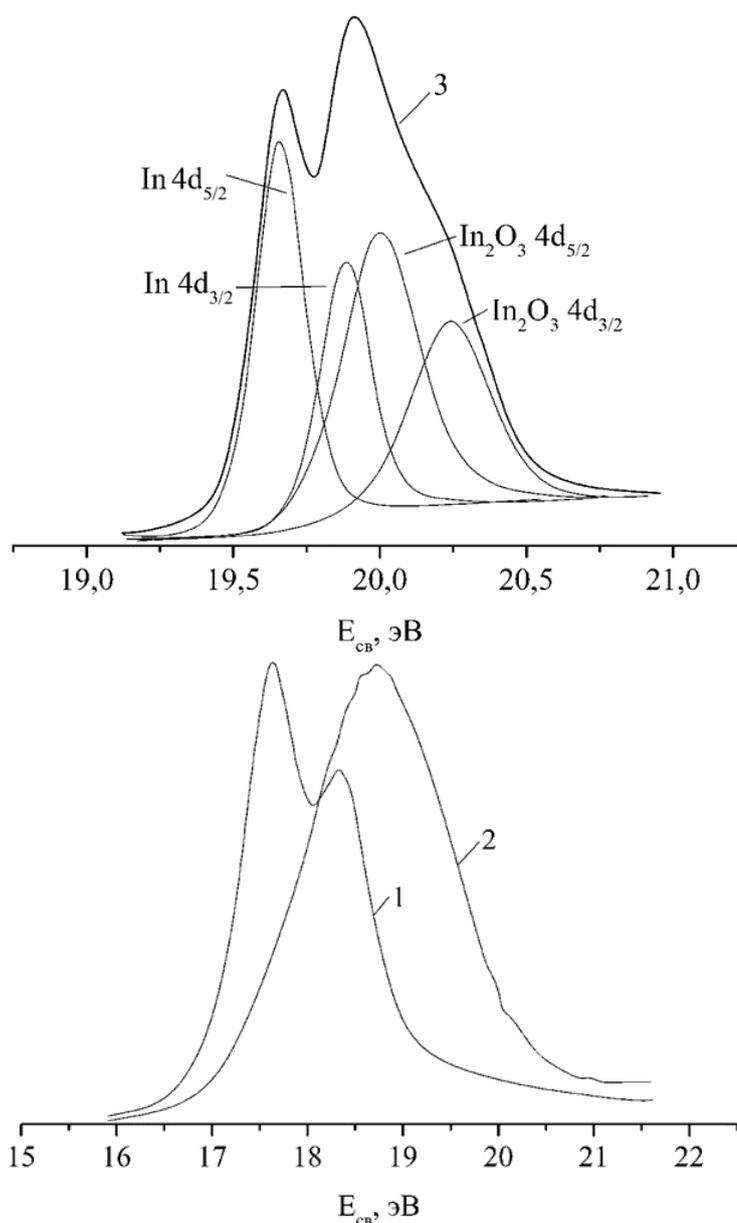


Рис. 8. Спектры 4d для In (1), для  $\text{In}_2\text{O}_3$  (2) и индия, подвергнутого воздействию ионами кислорода (3)

В настоящее время имеется много методик и приборов для определения в жидком состоянии

таких поверхностных характеристик металлов и сплавов, как поверхностное натяжение, плотность, работа выхода электрона и др. Однако их недостатком является отсутствие возможности контролировать состояние поверхности и ее химический состав. В этом случае адсорбцию и поверхностные концентрации компонентов в сплавах рассчитывают с использованием значений поверхностного натяжения, полученных в экспериментах. В нашем распоряжении имелись методы, позволяющие напрямую анализировать состав поверхности, как в твердом, так и в жидком состоянии. На наш взгляд, было бы интересно измерить поверхностное натяжение и поверхностный состав металлов сочетая возможности методов анализа поверхности и одного из методов определения поверхностного натяжения при строгом контроле внешних воздействий, таких как заряженные частицы, поверхностно-активные примеси, состав остаточного газа.

На рисунке 9 (кривая 1) представлена изотерма поверхностных концентраций, из которой следует, что для указанной системы на поверхность сплавов сегрегирует висмут на всем интервале объемных концентраций. На изотермах поверхностной концентрации и поверхностного натяжения расплавов Tl-Bi отсутствуют какие-либо особые точки (рисунок 9, кривая 2). Висмут поверхностно-активен по отношению к таллию на всем интервале объемных концентраций. Изотермы имеют «гладкий» вид, но наша изотерма лежит выше, полученной в [1].

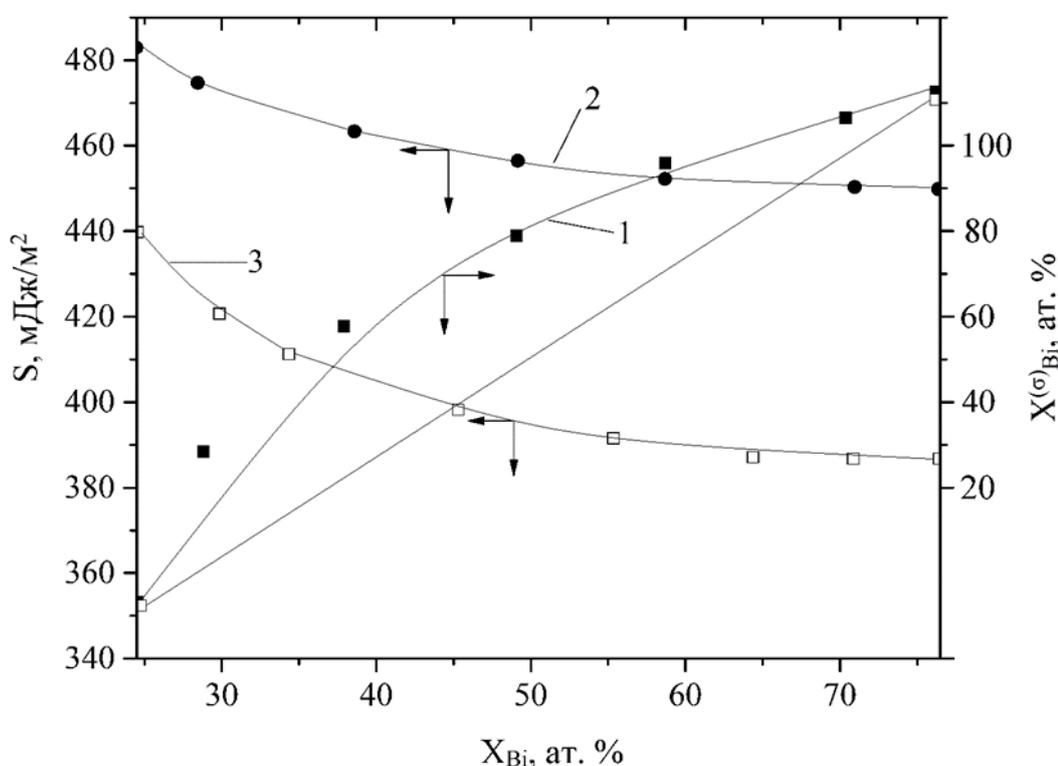


Рисунок 9 - Поверхностная сегрегация ( $T = 623$  K) в расплавах Tl-Bi, рассчитанная с учетом матричных эффектов (кривая 1) ( $x_{Bi}$ ,  $x_{Bi}^{\sigma}$  – объемная и поверхностная концентрация Bi). Поверхностное натяжение (623 K) расплавов Tl-Bi: кривая 2 – наши данные, кривая 3 – данные из [1].

Изотермы поверхностной концентрации (кривая 1) поверхностного натяжения  $\sigma(x)$  (кривая 2) сплавов натрий-калий с атомарно-чистой поверхностью при температуре 373 K приведены на рисунке 10. Для сравнения на этом же рисунке представлены данные  $\sigma(x)$ , полученные ранее методом «большой» капли (кривая 3) [2] и авторами [3] (кривая 4). Видно, что значения  $\sigma(x)$ , полученные методом «большой» капли, лежат ниже полученных в настоящей работе. Сравнение теоретически рассчитанных изотерм поверхностного натяжения для Na-K [4] с нашими данными показало удовлетворительное согласие с результатами, полученными нами методом «большой» капли (рисунок 10, кривая 3).

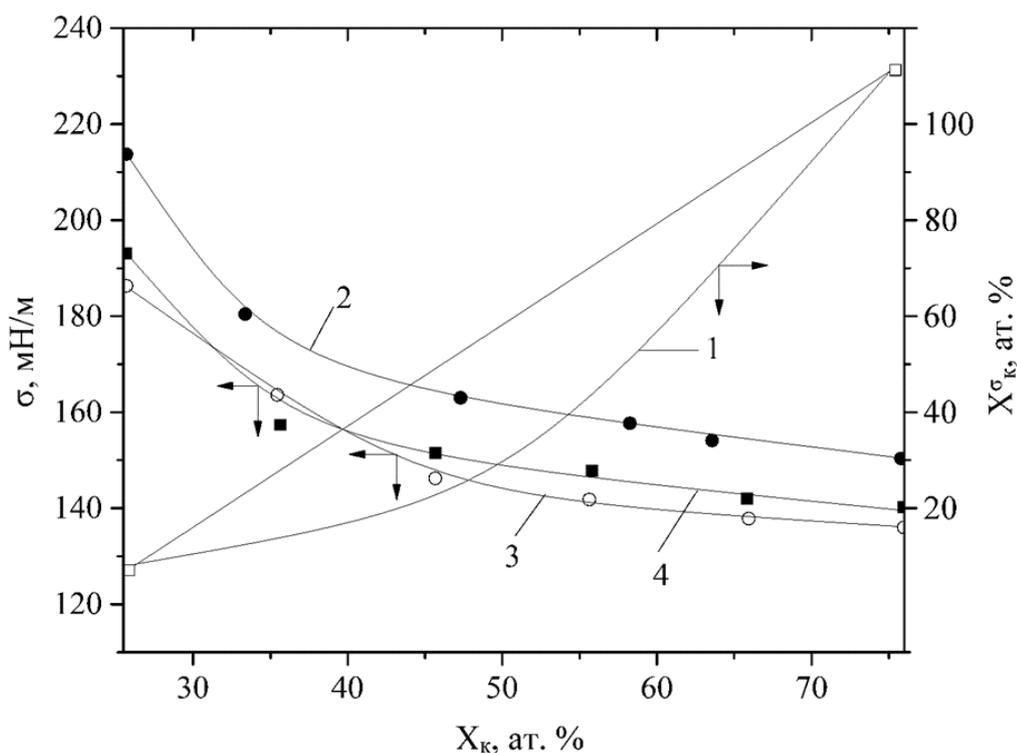


Рис. 10. Изотермы поверхностной концентрации (1) и поверхностного натяжения (2 – наши данные, 3 – [2], 4 – [4]) для натрий-калий при  $T = 373 \text{ K}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В научно-исследовательской лаборатории создана локальная сеть, позволяющая проводить и контролировать эксперименты по физике поверхности в удаленном режиме.
2. Разработаны схемы и программное обеспечение на языке DELPHI, обеспечивающие накопление и эффективную математическую обработку первичной экспериментальной информации, регистрируемой модернизированным приемным трактом оже-спектрометра.
3. Реализованы методики приготовления образцов химически активных металлов с атомарно-чистой поверхностью и измерения их поверхностных характеристик.
4. Для индия и таллия определена максимальная доза электронного облучения, при которой не наблюдается ЭСА, а также изучены миграционные процессы кислорода с неочищенных участков поверхности металлов. Для таллия эффект электронной стимуляции процесса окисления наблюдается, начиная с низких энергий около 100 эВ.
5. Выдержка образцов поликристаллического серебра в парах воды при атмосферном давлении не приводит к образованию объемных структур со стехиометрией оксидов серебра. В этом случае на поверхности образуется слой молекулярного кислорода, а в приповерхностных слоях – кислород, растворенный в октаэдрических пустотах серебра, с РФЭ-спектром, типичным для атомарного кислорода в составе  $\text{Ag}_2\text{O}$ .
6. По мере насыщения поверхности и подповерхностных слоев Ag кислородом при бомбардировке ионами  $\text{O}^+$  происходит существенное ослабление связей Ag-O и стимулируется образование структур, которые могут быть отнесены к различным ассоциированным формам кислорода в кластерных структурах  $\text{AgO-O}_x$ .
7. Рассчитанные значения параметра Вагнера и результаты компонентного анализа 4d-пика In подтверждают наличие на поверхности оксида индия, возникающего после бомбардировки ее ионами кислорода.
8. В условиях сверхвысокого вакуума при полном отсутствии примесей на исследуемых поверхностях методом «большой» капли измерено поверхностное натяжение Na, K, Tl, Bi и двойных сплавов Na-K и Tl-Bi на всем концентрационном интервале.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Алероев, М. А. Структурные изменения поверхности поликристаллического алюминия под действием ионов аргона / М.А. Алероев, Д.А. Крымшочалова, О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова //

- Тезисы докладов XV Всероссийской школы–семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества. – Екатеринбург, 2014. – № 15. – С. 177.
2. **Алероев, М. А.** Поверхностный рельеф поликристаллического алюминия после ионного воздействия / М.А. Алероев, Ашхотов, И.Б. О.Г. Ашхотова, Т.Т. Магкоев, А.П. Блиев // Коллективная монография «Актуальные проблемы современного материаловедения». – Грозный, 2015. – Т.1. – С. 79-89.
  3. **Ашхотов, О. Г.** Исследование поверхности расплавов таллий – висмут / О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова, Т.Т. Магкоев, А.П. Блиев, Г.С. Григоркина, М.А. Алероев, И.О. Максименко, А.Ю. Бегиев // Сборник научных материалов международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке». – Тамбов, 2016. – № 2. – С. 14-16.
  4. **Ашхотов, О. Г.** Влияние внешнего воздействия на состояние поверхности поликристаллического серебра / О.Г. Ашхотов, С.А. Хубежов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова, Т.Т. Магкоев // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника». – М., 2018. – С. 107-111.
  5. **Ашхотов, О. Г.** Приготовление атомарно-чистых поверхностей жидких металлов и сплавов / О.Г. Ашхотов, М.А. Алероев, М.Х. Дышекова, И.Б. Ашхотова // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Закономерности развития современного естествознания, техники и технологий». – Белгород, 2018. – С. 7-10.
  6. **Ашхотов, О. Г.** Аппаратное и программное обеспечение электронного спектрометра поверхности / О.Г. Ашхотов, М.А. Алероев, А.А. Кетенчиев, М.Ю. Ашибокова, М.Х. Дышекова, И.Б. Ашхотова // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы образования и науки». – Тамбов, 2018. – № 1. – С.15-18.
  7. **Алероев, М. А.** Морфология поверхности алюминия после ионной бомбардировки / М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова, О.Г. Ашхотов, Т.Т. Магкоев, А.П. Блиев // Тезисы докладов двенадцатого российского симпозиума «Атомистическое моделирование, теория и эксперимент». – Новый Афон, 2015. – № 12. – С. 4.
  8. **Ашхотов, О. Г.** Состояние кислорода в приповерхностных слоях поликристаллического серебра после воздействия парами воды / О.Г. Ашхотов, С.А. Хубежов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова, Т.Т. Магкоев, Е.Н. Козырев // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Нальчик-Ростов-на-Дону-Грозный-пос. Южный, 2017. – Т.1. – № 7. – С. 27-30.
  9. **Крымшюкалова, Д. А.** Кинетика электронно-стимулированного роста концентрации кислорода и образование наноструктурных пленок оксида таллия / Д. А. Крымшюкалова, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова О.Г. Ашхотов // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Школа, вуз: Современные проблемы математики, информатики и физики». – Грозный, 2013. – С. 237-243.
  10. **Ашхотов, О. Г.** Влияние бомбардировки ионами кислорода на состав поверхности поликристаллического серебра / О.Г. Ашхотов, С.А. Хубежов, М.А. Алероев, Т.Т. Магкоев, Г.С. Григоркина // Журнал физической химии. – 2018. – Т.92. – № 7. – С. 1139-1143.  
**Ashkhotov, O. G.** Effect of bombardment with oxygen ions on the surface composition of polycrystalline silver / O.G. Ashkhotov, M.A. Aleroev, S.A. Khubezhov, T.T. Magkoev, G. S. Grigorkina // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2018. – V.92. – No. 7. – P. 1382-1385.
  11. **Ашхотов, О. Г.** Влияние бомбардировки ионами кислорода на состояние поверхности индия / О.Г. Ашхотов, С.А. Хубежов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова, Т.Т. Магкоев // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Нальчик-Ростов-на - Дону-Грозный-Шепси, 2018. – № 8. – С. 133-136.
  12. **Алероев, М. А.** Исследование поверхности индия после экспозиции в среде кислорода / М.А. Алероев, О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Нальчик-Ростов-на - Дону-Грозный-Шепси, 2018. – № 8. – С. 41-44.
  13. **Ашхотов, О. Г.** Поверхностные характеристики двойных расплавов таллий–висмут / О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова, М.А. Алероев, А.П. Блиев Т.Т. Магкоев // Журнал физической химии. – 2017. – Т. 91. – № 2. – С. 368-371.

- Ashkhotov, O. G.** Surface characteristics of two-component thallium–bismuth melts / O.G. Ashkhotov, M.A. Aleroev, I.B. Ashkhotova, S.A. Khubezhov, T.T. Magkoev, A.P. Bliiev // *Russian Journal of Physical Chemistry A.* – 2017. – V.91. – No. 2. – P. 386-389.
14. **Ашхотов, О. Г.** Поверхностные свойства натрия, калия и их двойных сплавов в жидком состоянии / О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова, М.А. Алероев, Т.Т., Магкоев, А.П. Блиев // *Журнал физической химии.* – 2017. – Т.91. – № 7. – С. 1171-1173.
- Ashkhotov, O. G.** Surface properties of sodium, potassium, and their binary alloys in the liquid state / O.G. Ashkhotov, M.A. Aleroev, I.B. Ashkhotova, S.A. Khubezhov, T.T. Magkoev, A.P. Bliiev // *Russian Journal of Physical Chemistry A.* / 2017. – V.91. – No. 7. – P. 1270-1272.
15. **Ашхотов, О. Г.** Химический состав поверхности поликристаллического серебра, выдержанного в парах воды / О.Г. Ашхотов, С.А. Хубежов, М.А. Алероев, Г.С. Григоркина, И.Б. Ашхотова, Т.Т. Магкоев, А.П. Блиев, А.Г. Рамонова, Д.Д. Кризов // *Журнал физической химии.* – 2018. – Т.92. - № 1. – С. 143-146.
- Ashkhotov, O. G.** Chemical composition of surfaces of polycrystalline silver held in water vapor / O.G. Ashkhotov, S.A. Khubezhov, M.A. Aleroev, G.S. Grigorkina, I.B. Ashkhotova, T.T. Magkoev, A.P. Bliiev, A.G. Ramonova, D.D. Kibizov // *Russian Journal of Physical Chemistry A.* – 2018. – V.92. – No. 1. – P. 160-163.
16. **Ашхотов, О. Г.** Окисление поверхности индия бомбардировкой ионами кислорода / О.Г. Ашхотов, С.А. Хубежов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова, Т.Т. Магкоев // *Журнал физической химии.* – 2019. – Т.93. – № 3. – С. 438-441.
- Ashkhotov, O. G.** Surface oxidation of indium via oxygen ion bombardment / O.G. Ashkhotov, S.A. Khubezhov, M.A. Aleroev, I.B. Ashkhotova, T.T. Magkoev // *Russian Journal of Physical Chemistry A.* – V.93. – No. 3. – P. 551-554.
17. **Ашхотов, О. Г.** Низкотемпературное окисление поликристаллического серебра в парах воды / О.Г. Ашхотов, С.А. Хубежов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова, Т.Т. Магкоев, А.П. Блиев, Е.Н. Козырев // *Поверхность. Рентгеновские, Синхротронные и Нейтронные исследования.* – 2018. – № 5. – С. 109-112.
- Ashkhotov, O. G.** Low-temperature oxidation of polycrystalline silver in water vapor / O.G. Ashkhotov, M.A. Aleroev, I.B. Ashkhotova, S.A. Khubezhov, T.T. Magkoev, A.P. Bliiev, E.N. Kozirev // *Journal of surface investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* – 2018. – V. 12. – No. 3. – P. 513-515.
18. **Алероев, М. А.** Приемный тракт электронного спектрометра поверхности с цифровым синхронным детектированием полезного сигнала / О.Г. Ашхотов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова // *Приборы и техника эксперимента.* – 2018. – № 4. – С. 154-155.
19. **Ашхотов, О. Г.** Формирователь импульсов модуляции с прецизионной установкой частоты / О.Г. Ашхотов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова // *Приборы и техника эксперимента.* – 2018. – № 4. – С. 156-157.
20. **Алероев, М. А.** Кинетика электронных спектров поверхности индия с адсорбированным кислородом / М.А. Алероев, О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* – 2018. – № 10. – С. 6-12.
21. **Ашхотов, О. Г.** Ионная стимуляция процесса азотирования поверхности олова / О.Г. Ашхотов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова // *Сборник трудов по научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника».* – М., 2019. – С. 7-11.
22. **Ашхотов, О. Г.** О проблемах подготовки образцов высокоактивных металлов для спектроскопического анализа поверхности / О.Г. Ашхотов, М.А. Алероев, И.Б. Ашхотова // *22-й Международный междисциплинарный симпозиум «Порядок, беспорядок и свойства оксидов».* – Ростов-на-Дону-Москва- пос. Шепси, 2019. – С. 20-23.
23. **Ашхотов, О. Г.** Электронно-стимулированная адсорбция кислорода на поверхности металлов и полупроводников / О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова, М.А. Алероев, Д.А. Крымшочалова // *Межвузовский сборник научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».* – Тверь, 2019. – № 11. – С. 26-39.
24. **Ашхотов, О. Г.** Влияние термообработки на состояние тонкопленочной системы Cr + Ni на кремнии / О.Г. Ашхотов, И.Б. Ашхотова, М.А. Алероев, Д.А. Крымшочалова // *Межвузовский сборник научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».* – Тверь, 2019. – № 11. – С. 535-539.
25. **Ашхотов, О. Г.** Система цифрового синхронного детектирования полезного сигнала электронного спектрометра поверхности / О.Г. Ашхотов, Т.Т. Магкоев, Г.С. Григоркина, Д.Д.

Кибизов, А.Г. Рамонова, М.А. Алероев, А.А. Кетенчиев, М.Ю. Ашибокова // Архивариус. – 2017. – № 1 (16). – С. 78-81.

#### Цитированная литература

1. Дадашев Р.Х. Термодинамика поверхностных явлений. 2007. М.: Физматлит, 280 с.
2. Алчагиров, Б. Б. Поверхностное натяжение сплавов системы натрий-калий / Б. Б. Алчагиров, Л. Х. Афаунова, З. А. Кегадуева, Р. Х. Архестов, Т. М. Таова, Х. Б. Хоконов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2010. – №1. – С. 59-65.
3. Осико, Т. П. Поверхностное натяжение бинарных расплавов щелочных металлов. Сплавы натрий-калий / Т. П. Осико, Б. Б. Алчагиров // Теплофизика высоких температур. – 1987. – Т. - 25. – № 4. – С. 809-812.
4. Шебзухов, А. А. Поверхностное натяжение жидких щелочных металлов и их сплавов / А. А. Шебзухов, Т. П. Осико, Ф. М. Кожокова, А. Г. Мозговой // Журнал Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – 1981. – № 5. – 141 с.