

ISSN 1694-6634

[www.iopjournal.org](http://www.iopjournal.org),

эл.почта: [info@iopjournal.org](mailto:info@iopjournal.org)



научный журнал

# ФИЗИКА

илимий журналы

2025, №1

Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева  
Национальной академии наук Кыргызской Республики

ISSN 1694-6634

[www.iopjournal.org](http://www.iopjournal.org)

эл. почта: [info@iopjournal.org](mailto:info@iopjournal.org)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

# ФИЗИКА

ИЛИМИЙ ЖУРНАЛЫ

2025, №1

Кыргызстан, г. Бишкек

## НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ФИЗИКА

### Учредитель:

Институт физики им. академика  
Ж.Жеенбаева Национальной  
академии наук Кыргызской  
Республики

Журнал зарегистрирован в  
Министерстве юстиции Кыргызской  
Республики.

Свидетельство о регистрации №1418  
от 13 июня 2008г.

ISSN 1694-6634

### Редакционная коллегия:

Главный редактор, д. ф.-м. н.,  
член-корр. НАН КР

Зам. главного редактора, д. ф.-м.  
н., профессор

Ответственный секретарь,  
к. ф.-м. н., с. н. с.

**Жеенбаев Нурбек Жаныбекович**

**Касмамытов Нурбек Кыдырмышевич**

**Ласанху Керим Арсаевич**

### Члены редколлегии:

А. А. Кутанов

Т. С. Рамазанов

М. М. Кидибаев

Э. М. Мамбетакунов

Б. В. Шульгин

Т. Н. Нурахметов

С. Джуманов

М. Имаев

А. А. Назаров

В. Н. Фоломеев

Р. М. Султаналиева

Н. К. Джаманкызов

Г. Дж. Кабаева

А. Т. Татыбеков

В. Ю. Иванов

К. Х. Хайдаров

К. Шаршеев

У. К. Мамытбеков

Г. Ж. Доржуева

Дж. А. Исмаилов

Б. Б. Саякбаева

Б. К. Рахадиллов

С. Г. Джабаров

Академик НАН КР (Кыргызстан)

Академик НАН РК (Казахстан)

Академик НАН КР (Кыргызстан)

Член-корр. НАН КР (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Казахстан)

д. ф.-м. н., профессор (Узбекистан)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

член-корр. НАН КР (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

д. т. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (Россия)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

д. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. т. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (техн. секр-рь) (Кыргызстан)

PhD, профессор (Казахстан)

д. ф.-м. н. (Азербайджан)

### Адрес редакции:

720071, Кыргызская Республика,  
г. Бишкек, проспект Чуй, 265-а

Тел.: +(312) 64-62-90

Факс: +(312) 43-11-69, 43-11-71

E-mail: MegaCom17@mail.ru

УДК:725.74:678.021.13 (575.8-25)

## ОБЗОР МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ВОДЫ СПОРТИВНО - ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫХ БАСЕЙНОВ Г. БИШКЕК

<sup>1,2</sup>Гуринович А., <sup>1,2</sup>Ниязбеков И.Т.

<sup>1</sup>Кыргызско-инженерно строительный института им.Н.Исанова

<sup>2</sup>КГТУ им. И. Раззакова г. Бишкек, Кыргызская Республика

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные методы очистки воды применяемые в спортивно- оздоровительных бассейнах г.Бишкек. Произведен анализ влияния температуры на кислотность pH- кислотности воды в бассейне.

**Ключевые слова:** бассейн, кислотность, температура, насос, водоподготовка.

## REVIEW OF WATER PURIFICATION METHODS FOR SPORTS AND RECREATION POOLS IN BISHKEK

<sup>1,2</sup>Gurinovich A., <sup>1,2</sup>Niyazbekov I.T.

<sup>1</sup>Kyrgyz-Engineering Institute named after N.Isanov

<sup>2</sup>KSTU named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic

**Annotation.** Makalada Bishkek shaaryndagy sporttuk zhana es aluu basinderinde koldonulgan suunu tazaloonun negizgi ykmalary talkulanat. Temperature in pooldegi suunun pH-acid taluuluguna tiygizgen taasirine taldoо zыrguуzyldy.

**Key words:** pool, acidity, temperature, pump, water treatment.

**Введение.** В настоящее время актуальность водоподготовки воды в бассейне является ни мало важным процессом в спортивно-оздоровительных учреждениях. Качество воды влечет за собой состояние плавающих в процессе тренировок, а точнее их самочувствие.

**Цель работы.** Произвести обзор методов очистки воды в спортивных оздоровительных бассейнах, а также произвести анализ кислотности воды.

Существуют методы очистки воды в бассейнах их подразделяют на несколько видов:

1. Механический

2. Химический

3. Электрофизический

Правильность выбора метода очистки воды основывается на следующие факторы:

- объём воды бассейна;
- количество посетителей;
- тип бассейна (открытый или закрытый);
- жесткость воды от этого зависит эффективность очистки воды.

Рассмотрим механический метод очистки и водоподготовки воды. Он основан на установки фильтра который сможет своей мощностью прогонять полный объём жидкости через себя 5-7 раз в сутки. Если требуется высокое

качество очистки воды, применяют фильтрующий материал в качестве гранитной засыпки или диатомовый песок. Недостаток такого механического метода очистки воды заключается в том, что он не избавляет бассейн от микроорганизмов, что впоследствии приводит к цветению и неприятному запаху. Поэтому решение этой проблемы применяют химический метод очистки воды. Применение химического метода очистки воды применяется во всех спортивно-оздоровительных учреждениях на территории г. Бишкек. Данный метод основан на эффективности борьбы с микроорганизмами, которые способствуют появлению водорослей [1-2].

В отличие от выше рассмотренных методов электрофизический метод очистки воды основан на выработки хлора электролизными установками работающих на слабосаленной воде. Данный метод является дорогостоящим и поэтому данный метод не является перспективным в установке бассейнов в г.Бишкек.

Рассмотрим систему очистки воды в детско-спортивного бассейна объем, которого составляет  $V_{\text{вода}} = 125\text{м}^3$ .



Рис. 1. Бассейн г.Бишкек.

Система очистки данного бассейна имеет три насоса и три фильтра. Вода поступает в переливную емкость, далее проходит через три фильтра и поступает в емкость (танк), а после через форсунки подается в резервуар бассейна.

Состояние воды на кислотность рН определяют анализаторами. Контроль и регулировка химического баланса воды необходимы для предотвращения роста бактерий и водорослей. Регулярно проверяйте уровень рН (он должен составлять от 7,2 до 7,8), щелочность и содержание хлора[2, 4, 5].

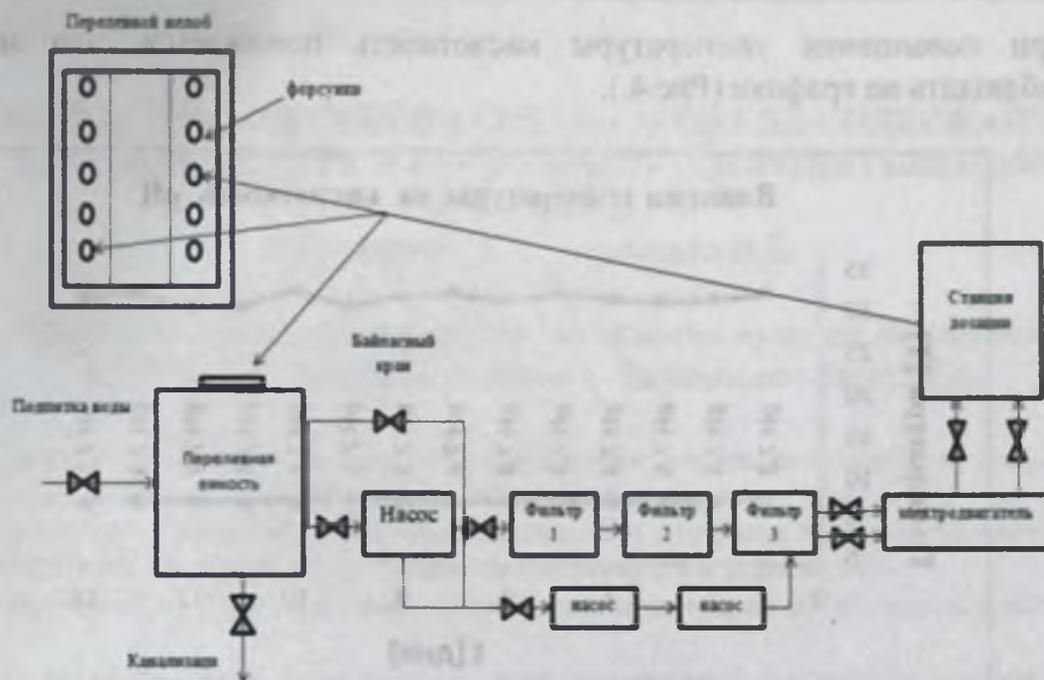


Рис.2. Блок-схема очистки воды бассейна.



а)



б)

Рис.3. Анализатор для определения кислотности и хлора.

Применение анализатора позволяет определить состав воды на кислотность и состав хлора. На рис.3. (а)- имеется жидкость с права (Ортолидин ОТО), служит для определения количества хлора в воде, (б)- Фенол служит для определения кислотности рН (кислотность). При на братии воды с бассейна в специальную пробирку добавляют эти химические препараты в каждый отсек по 6 капель. Далее происходит изменение цвета воды и с помощью шкалы определяют параметры кислотности и состава хлора. Влияние состава воды на уровень содержание кислотности влияет также температура.

При повышении температуры кислотность понижается, это мы можем наблюдать на графике (Рис.4.).

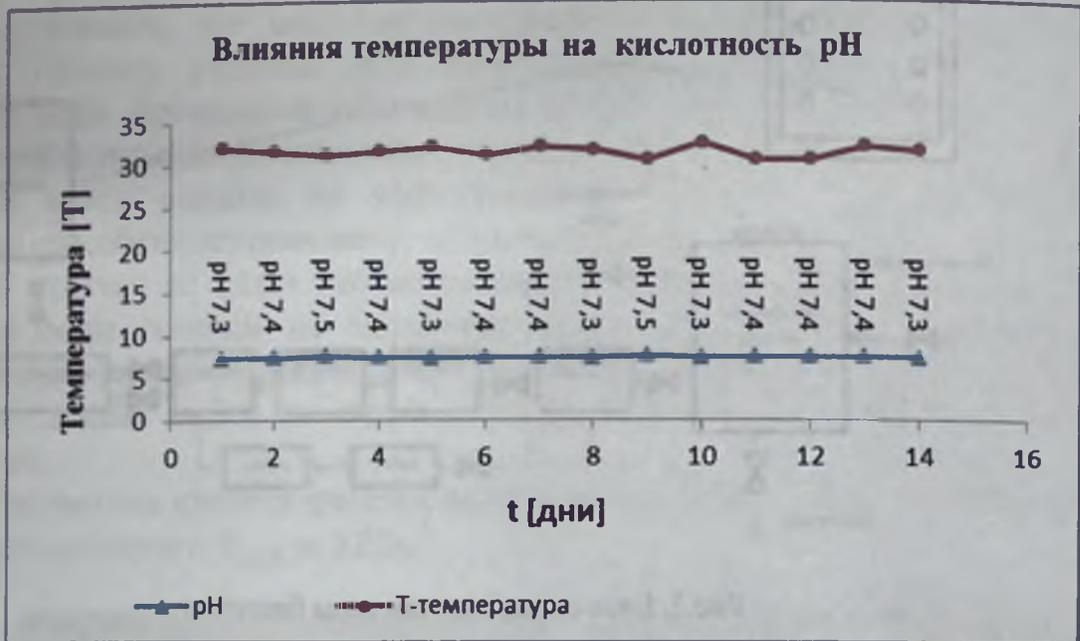


Рис. 4. Взаимодействие температуры на кислотность pH.

**Вывод.** Системы очистки воды имеют свою специфику и конструкцию, что ведет за качеством воды в бассейне. Многие факторы влияют на состав качества воды в данном случае температура имеет важную роль в этом процессе. При повышении температуры кислотность понижается, хлор улетучивается быстрее. Поэтому необходимо соблюдать все нормы для содержания качественной воды.

### Список литературы

1. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды. М.: С.-301, 2004г.
2. Кедров В.С., Кедров Ю.В., Чухин В.А. Плавательные бассейны. Водоснабжение и водоотведение. Учебное пособие. М.: С.-184, 2002г.
3. Зуев К.И. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения / ВлГУ. – Владимир.: С.- 224, 2016г.
4. Павлинова И.И., Баженов В.И., Губий И.Г. Водоснабжение и водоотведение. – М.: С.-21.2012г.
5. Орлов Е.В. Инженерные системы зданий и сооружений. Водоснабжение и водоотведение. – Екатеринбург: С.-216, 2015г.

УДК:725.74:725.51(543.319)

## АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ НА СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОТНОСТИ Ph В СПОРТИВНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОМ БАССЕЙНЕ

<sup>1,2</sup>Гуринович А., <sup>1,2</sup>Ниязбеков И.Т.

<sup>1</sup>Кыргызско-инженерно строительный института им.Н.Исанова  
<sup>2</sup>КГТУ им. И. Раззакова г. Бишкек, Кыргызская Республика

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности анализа химического состава воды в спортивно-оздоровительном бассейне с акцентом на определение уровня кислотности (pH). Также проведено сравнение двух основных способов дозировки химических реагентов — ручного и автоматического, с выделением их преимуществ и недостатков.

**Ключевые слова:** бассейн, кислотность, температура, насос, водоподготовка.

## ANALYSIS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER FOR THE CONTENT OF ACIDITY Ph IN A SPORTS AND RECREATION POOL

<sup>1,2</sup>Gurinovich A., <sup>1,2</sup>Niyazbekov I.T.

<sup>1</sup>Kyrgyz-Engineering Institute named after N.Isanov  
<sup>2</sup>KSTU named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic

**Annotation.** The article discusses the features of analyzing the chemical composition of water in a sports and recreation pool with an emphasis on determining the level of acidity (pH). A comparison was also made between the two main methods of dosing chemical reagents — manual and automatic, highlighting their advantages and disadvantages.

**Key words:** pool, acidity, temperature, pump, water treatment.

**Введение.** Качество воды в спортивно-оздоровительных бассейнах является одним из ключевых факторов, влияющих на здоровье посетителей и долговечность оборудования. Одним из важнейших показателей качества воды является уровень кислотности, выражаемый через показатель pH. Контроль и поддержание оптимального уровня pH обеспечивает безопасность купающихся, предотвращает развитие микроорганизмов и снижает коррозионное воздействие на конструкции бассейна.

Показатель pH характеризует концентрацию ионов водорода в воде и определяет её кислотно-щелочной баланс. В спортивных бассейнах оптимальный диапазон pH обычно находится в пределах 7,2–7,6. Значения ниже 7,0 указывают на кислую среду, что может вызывать раздражение кожи и слизистых оболочек у посетителей, а также ускорять коррозию металлических элементов оборудования. Значения выше 7,8 свидетельствуют о щелочной среде, способствующей образованию известковых отложений и снижению эффективности дезинфекции.[1-3]

**Цель работы.** Произвести обзор методов очистки воды в спортивных оздоровительных бассейнах, а также произвести анализ кислотности воды, а

также провести сравнительный анализ автоматического дозирующего устройства с ручным.

Рассмотрим систему очистки воды в детско-спортивного бассейна объем, которого составляет  $V_{\text{вода}} = 125\text{м}^3$ .



Рис. 1. Бассейн г.Бишкек.



а)



б)

Рис.2. Анализатор для определения кислотности и хлора.

Система очистки данного бассейна имеет три насоса и три фильтра. Вода поступает в переливную емкость, далее проходит через три фильтра и поступает в емкость (танк), а после через форсунки подается в резервуар бассейна.

Состояние воды на кислотность рН определяют анализаторами. Контроль и регулировка химического баланса воды необходимы для предотвращения роста бактерий и водорослей. Регулярно проверяйте уровень рН (он должен составлять от 7,2 до 7,8), щелочность и содержание хлора[4-6].

Применение анализатора позволяет определить состав воды на кислотность и состав хлора. На рис.2 (а)- имеется житкость с права (Ортолидин ОТО), служит для определения количества хлора в воде, (б)- Фенол служит для определения кислотности рН (кислотность). При на братии воды с бассейна в специальную пробирку добавляют эти химические препараты в каждый отсек по 6 капель. Далее происходит изменение цвета воды и с помощью шкалы определяют параметры кислотности и состава хлора.



Рис.3. Станция дозирования МАЭСТРО ДУЭТ 2.0 PH/RX.

Таблица 1- Сравнительный анализ автоматической и ручной дозировки

Критерий	Ручная дозировка	Автоматическая дозировка
Точность	Средняя, зависит от персонала	Высокая, благодаря датчикам
Стоимость	Низкая	Высокая
Надежность	Зависит от квалификации персонала	Высокая при правильном обслуживании
Экономия реагентов	Низкая	Высокая
Время персонала	Значительное	Минимальное
Гибкость	Высокая	Ограничена настройками системы

Сравнение химической дозировки в бассейне: ручной и автоматический методы.

В современных спортивно-оздоровительных бассейнах поддержание оптимального химического состава воды — одна из важнейших задач для обеспечения безопасности и комфорта посетителей. Одним из ключевых

процессов является дозировка химических реагентов (например, дезинфицирующих средств, регуляторов pH). Существует два основных способа внесения химикатов: ручной и автоматический. Рассмотрим их особенности, преимущества и недостатки

Ручная дозировка:

Ручная дозировка предполагает, что оператор самостоятельно рассчитывает необходимое количество химических веществ и вносит их в воду вручную. Обычно это происходит с помощью мерных емкостей, шприцев или специальных дозаторов.

Автоматическая дозировка:

Автоматическая система дозировки использует датчики (например, pH-метры, редокс-электроды), которые непрерывно контролируют параметры воды и автоматически регулируют подачу химических реагентов через насосы-дозаторы.

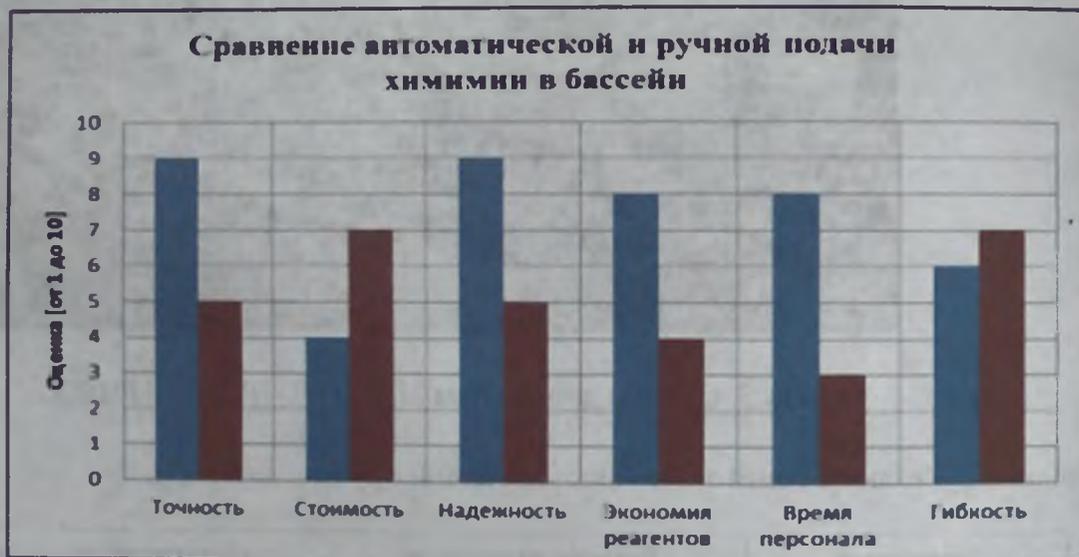


Рис.3. Гистограмма сравнения автоматического и ручного дозирования.

**Вывод.** Выбор между ручной и автоматической дозировкой зависит от масштаба бассейна, бюджета и требований к качеству воды. Для крупных спортивно-оздоровительных комплексов автоматизация процесса является оптимальным решением, обеспечивающим стабильность параметров воды и безопасность посетителей. В то же время для небольших объектов с ограниченными ресурсами ручной метод может оставаться приемлемым вариантом при условии внимательного контроля со стороны персонала.

**Список литературы**

1. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды. М.:С.-301, 2004г.
2. Кедров В.С., Кедров Ю.В., Чухин В.А. Плавательные бассейны. Водоснабжение и водоотведение. Учебное пособие. М.:С.-184, 2002г.

3. Зуев К.И. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения / ВлГУ. – Владимир.:С.- 224, 2016г.
4. Павлинова И.И., Баженов В.И., Губий И.Г. Водоснабжение и водоотведение. – М.: С.-21.2012г.
5. Орлов Е.В. Инженерные системы зданий и сооружений. Водоснабжение и водоотведение. – Екатеринбург: С.-216, 2015г.
6. Кузнецов, В. И. (2015). Технология водоподготовки для бассейнов. Москва: Издательство "Стройиздат".

УДК.531.111

## **ВЫЯВЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ПРОСТРАНСТВА И АБСОЛЮТНОЙ СКОРОСТИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ.**

У.И. Мамыров, М.М. Кидибаев

*Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР, Кыргызстан,  
г.Бишкек, пр.Чуй 265-а.*

**Аннотация.** В работе рассмотрены абсолютная скорость частиц (тела) связана существованием абсолютного механического движения тела, было определено, что «Абсолютное механическое движение есть перемещение тела из одного абсолютного его места в другое», а место в абсолютном пространстве по определению И. Ньютона не двусмысленно принятое в основе своей теории неподвижны. Приведено, что «Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным».

**Ключевые слова:** Абсолютное пространство, скорость, время, частица, тела, механическое движение, аксиома, теория, этап, схема, формула, доказательство, понятие.

## **IDENTIFICATION OF ABSOLUTE SPACE AND ABSOLUTE VELOCITY OF MATERIAL OBJECTS**

U.I. Mamyrov, M.M. Kidibaev

*Institute of Physics by Academician J. Jeenbayev of the National Academy of  
State, Kyrgyzstan, Bishkek, Chui 265-a.*

**Annotation.** The work examines the absolute speed of particles (body) associated with the existence of absolute mechanical motion of the body, there was a definition that “Absolute mechanical motion is the movement of a body from one absolute place to another”, and the place in absolute space according to the definition of I. Newton is unambiguously accepted as the basis of his theory of motionlessness. It is stated that «Absolute space by its very essence, regardless of anything external, always remains the same and motionless».

**Keywords:** Absolute space, speed, time, particle, bodies, mechanical motion, axiom, theory, stage, scheme, formula, proof, concept

Величайший физик, мыслитель и философ 17-го века Исаак Ньютон, исследуя наряду с другими основными понятиями физики, понятие

пространства, которое было начало формироваться со времен Аристотеля, уточняя и развивая его, дал следующее исчерпывающее определение: «Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным».

Абсолютная скорость частиц (тела) связана существованием абсолютного механического движения тела. И. Ньютоном дано было определение, что «Абсолютное механическое движение есть перемещение тела из одного абсолютного его места в другое (т.е. другое абсолютное место абсолютного пространства. М.У.)» [1], а место в абсолютном пространстве по определению И. Ньютона не двусмысленно принятое в основе своей теории, отраженное в его знаменитом труде «Математические начала натуральной философии» [1], неподвижны. То есть, как было приведено выше, что «Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным» [1].

Далее, «Как неизменен порядок частей времени, так неизменен порядок пространства. Если бы они переместились из мест своих, то они продвинулись бы (так сказать) в самих себя, ибо время и пространство составляют как бы вместилища самих себя и всего существующего. Во времени все располагается в смысле порядка последовательности, в пространстве в смысле порядка положения. По самой своей сущности они суть места, приписывать же первичным местам движение нелепо. В это-то места и суть места абсолютное и только перемещения из этих мест составляет абсолютное движение» [1].

Согласно положений классической теории физики (КТФ), основанной И. Ньютоном, в абсолютном пространстве происходящие механические движения каждого материального объекта (частиц, тела и т.д.) в данный момент времени наряду с бесконечным множеством его относительных скоростей относительно других материальных объектов, всегда имеется ещё, характерная для себя, только одна единственная абсолютная скорость, измеренная относительно неподвижного абсолютного пространства. Однако, это неподвижное абсолютное пространство до 19 века в науке принципиально не было возможностей обнаружить, тем самым не было возможности определить значение абсолютных скоростей материальных объектов.

В своё время, И. Ньютон прекрасно понимая, что в при том уровне человеческих знаний еще невозможно было определить абсолютную скорость тела, тем самым уровень человеческих знаний того периода не давал возможности обеспечить наблюдаемость неподвижного изотропного абсолютного пространства, тем не менее, он совершенно уверенно высказался, что обнаружение абсолютного пространства и абсолютной скорости тела - это главная задача ученых будущего. Но в соответствии с рядом обстоятельств в КТФ вплоть до конца 20го века определение абсолютной скорости тела особо не востребовалось.

Однако далее на период времени после 17го века физическая наука, особенно в 19-ом и 20-ом веках сильно развивалась во всех направлениях физики. Так, в направлении проблем, касающихся обнаружения абсолютного пространства вполне заслуживают должного внимания замечательные работы

английского физика Дж. Максвелла по теории электромагнитных явлений, которую он сформулировал в виде системы нескольких уравнений (называемых уравнениями Максвелла) и выражающих все основные закономерности электромагнитных явлений, дал определение электромагнитного поля и, самое главное, предсказал новый важный эффект – существование в свободном (вакуумном) пространстве электромагнитного излучения и его распространение в пространстве со скоростью света. Последнее дало ему основание считать свет одним из видов электромагнитного излучения.

Максвелл показал, что скорость электромагнитных волн в средах выражается через диэлектрическую  $\epsilon$  и магнитную  $\mu$  проницаемости среды [2]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}},$$

где  $\epsilon\epsilon_0$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды  
 $\mu\mu_0$  - абсолютная магнитная проницаемость среды.

В вакуумной среде  $\epsilon = 1$  и  $\mu = 1$ . Тогда  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$  - скорость света в вакууме.

Как видно, согласно этой формулы свет распространяется в вакууме на все стороны (направо, налево, вверх, вниз, вперед и назад) с одинаковой скоростью  $C$ .

Такая ситуация имеет место, когда среда, в которой распространяется свет в целом неподвижна, а в вакууме такие условия выполняются. Значит, вакуумная среда представляет собой неподвижную среду для распространения света. Это является нечто иное абсолютное пространство, определённое И. Ньютоном как неподвижное, неограниченное, однородное и изотропное.

Скорость света в вакууме  $C$  - это его абсолютная скорость относительно абсолютного неподвижного пространства.

Если не было бы одинакового, неподвижного абсолютного пространства, проявленного вакуумом, то не было бы и постоянной абсолютной скорости света в вакууме, не зависящей от направления излучения, от сезона времени года, суток от места излучения в абсолютном пространстве. В реальности абсолютная скорость света (и вообще электромагнитных излучений) в вакууме  $C$  везде и всегда является одинаковой (постоянной) относительно неподвижного абсолютного пространства.

Однако, это замечательное открытие, выявляющее Ньютоновское абсолютное пространство сам Максвелл своевременно не успел сформулировать. Он рано ушёл из жизни в возрасте 48 лет.

Следует отметить, что в рамках релятивистской теории физики (РТФ) один из своих постулатов теории было принято, что скорость света в вакууме не зависит от скорости источника, одинакова во всех инерциальных системах отсчета и равна  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$ . То есть скорость света в вакууме (измеренной относительно любой инерциальной системы М.У.) постоянна и не зависит ни от движения источника, ни от движения наблюдателя (приемника)»

[2]. Такое абсурдное утверждение в пределах РТФ подкрепляется таким же сомнительным законом сложения скоростей в РТФ.

В КТФ скорость света в вакууме т.е. в неподвижном абсолютном пространстве относительно неё называется абсолютной скоростью света в вакууме, она инвариантна, но относительно любого другого материального объекта (она инерциальна или не инерциальна кроме абсолютно покоящегося в абсолютном пространстве) соответственно может быть совершенно различной. Это главное отличие КТФ от РТФ.

Выше было отмечено, что абсолютная скорость объекта (тела, частицы) до конца 20го века в физике и в общем в человеческой деятельности не была востребована. Действительно, впервые она оказалась востребованной при дополнении основ Классической теории физики [3]. До этого уже в 90х годах 20го века был сформулирован закон инвариантности физических величин, имеющих первостепенное значение не только в физической науке, но и в познании объективного реального мира [4, 5]. Как раз по требованию выполнения этого закона необходимо было ввести понятие абсолютной скорости частицы (тела) в уравнение движения, т.е. второго закона Ньютона и только после этого все физические процессы и его результаты в дополненной основе КТФ приобретают однозначность, т.е. инвариантность [3].

Самое главное это то, что КТФ с дополненной основой без знания абсолютной скорости объекта относительно неподвижного абсолютного пространства неосуществима.

Ньютоновское однородное, изотропное, неподвижное абсолютное пространство проявляется еще строгим выполнением закономерности изменения массы частиц с изменением её абсолютной скорости, которое также не зависит от времени года, суток и сезона, месторасположения в абсолютном пространстве, взаимно подтверждая верность абсолютного пространства, установленной инвариантной скоростью излучений электромагнитных волн в вакууме.

Далее приведём возможное экспериментальное определение абсолютной скорости Земли, относительно абсолютного пространства.

Основываясь на положении современной КТФ [3], что свет (и вообще электромагнитное излучение) в вакууме распространяется с абсолютной скоростью  $C$  относительно однородного неподвижного абсолютного пространства независимо от скорости источника излучения, независимо от направления излучения и независимо от времени излучения.

При этом любые измерения своей относительной скорости относительно абсолютной скорости света в вакууме одновременно смогут определять своей абсолютной скорости относительно абсолютного пространства, основываясь на законе сложения векторных величин.

Так, относительная скорость света в вакууме относительно Земли (или это одно и то же, что и относительная скорость Земли относительно абсолютной скорости света в вакууме) выражается:

$$\vec{W}_1 = \vec{C} + \vec{V} \quad (1)$$

когда направление распространения света  $\vec{C}$  направлено противоположно абсолютной скорости Земли  $\vec{V}$ .

$$\vec{W}_2 = \vec{C} - \vec{V} \quad (2)$$

когда направление распространения света  $\vec{C}$  совпадает с направлением абсолютной скорости Земли  $\vec{V}$ .

С такими относительными скоростями свет преодолевает расстояние  $L$  по пути расположенной на земле (например в виде вакуумной трубы) за время

$$t_1 = \frac{L}{\vec{W}_1} = \frac{L}{\vec{C} + \vec{V}}, \quad (3)$$

когда свет направлен (или распространяется) против направления абсолютной скорости движения Земли в абсолютном пространстве

$$t_2 = \frac{L}{\vec{W}_2} = \frac{L}{\vec{C} - \vec{V}}, \quad (4)$$

когда свет распространяется по направлению абсолютной скорости движения Земли в абсолютном пространстве.

Из равенств (3) и (4) определяем значение  $L$ :

$$\left. \begin{aligned} \vec{L} &= t_1(\vec{C} + \vec{V}) \\ \vec{L} &= t_2(\vec{C} - \vec{V}) \end{aligned} \right\}$$

Отсюда:

$$t_1(\vec{C} + \vec{V}) = t_2(\vec{C} - \vec{V})$$

Далее

$$\begin{aligned} (t_1 + t_2) \cdot \vec{V} &= (t_2 - t_1) \cdot \vec{C} \\ \vec{V} &= \frac{(t_2 - t_1)}{(t_1 + t_2)} \cdot \vec{C} \end{aligned}$$

Таким образом, точность измерения абсолютной скорости движения Земли зависит в конечном счете от точности измерения  $\vec{t}_1$  и  $\vec{t}_2$ .

Как производится измерение  $\vec{t}_1$  и  $\vec{t}_2$ .

Поскольку процесс измерения производится на поверхности Земли, необходима герметизированная световодная вакуумная труба с длиной порядка  $L \geq 300$  метров и диаметром  $d \geq 10$  см. (такая длина трубы принята из соображения параметра предполагаемых измерительных приборов и ориентировочного значения измеряемых величин. Длина может быть и более короткой, если соответствующие измерительные приборы имеют разрешение с фемто-секундной длительностью). Располагать световодную вакуумную трубу горизонтально с ориентацией желательнее с востока на запад (или наоборот, с запада на восток). В обоих концах трубы должны быть установлены датчики света, отмечающие начало и конец распространения светового сигнала

пикосекундной длительности в соответствующих хронометрических устройствах. Параллельно с этими датчиками в одном конце этой трубы должно располагаться зеркало, отражающее световой сигнал на  $180^\circ$ , в другом конце трубы должно располагаться устройство ввода светового сигнала в трубу и направляющее этот сигнал строго по оси трубы в конец трубы, где расположено зеркало.

Когда световой сигнал через устройство ввода светового сигнала войдет в трубу и направится в другой конец трубы, как раз в этот момент одновременно фиксируется датчиком светового сигнала на хронометре с пикосекундной точностью, как  $\tau_1$  - момент времени совпадающий с началом распространения света. Когда этот свет дойдет до второго конца трубы, там одновременно регистрируется световой сигнал как  $\tau_2$  - момент времени, совпадающий с концом пути распространяющегося в одном направлении, и начале пути луча, распространяющегося в другом (обратном) направлении, которое уже было отражено зеркалом на  $180^\circ$  в обратном направлении к первому концу трубы. Когда свет дойдет обратно до начала трубы этот световой сигнал регистрируется как  $\tau_3$  - момент времени, совпадающий с концом пути луча, распространяющегося в обратном направлении.

Таким образом, измерения времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  производится с помощью двух пикосекундных часов, то есть у каждого конца световодной трубы соответственно хорошо синхронизированные друг с другом хронометры (часы), которые должны фиксировать начало пути и конец пути светового сигнала. Поскольку хронометры в обоих концах трубы высокой степени друг с другом синхронизированы, поэтому:

$$t_1 = \tau_2 - \tau_1 \quad t_2 = \tau_3 - \tau_2, \text{ где}$$

момент времени  $\tau_1$  и  $\tau_3$  отмечены в одном хронометре, расположенном в одном конце трубы. Момент времени  $\tau_2$  отмечен в хронометре, расположенном в другом конце трубы.

Наперед, для оценки ожидаемых значений цифры будущего эксперимента, ниже приведем численную теоретическую оценку ожидаемого результата при:

$$C = 300000 \text{ км/сек}$$

$$V = 30 \text{ км/сек}$$

$$L = 0.3 \text{ км,}$$

$L$  - длина световодной трубы.

Тогда

$$t_1 = \frac{L}{c+V} = \frac{0.3}{300030} = 0.0000009999 \text{ sec}$$

$$t_2 = \frac{L}{c-V} = \frac{0.3}{299970} = 0.00000100010 \text{ sec}$$

$$t_2 - t_1 = 0.0000010001 - 0.0000009999 = 2.0 \cdot 10^{-10} \text{ сек}$$

$$t_2 + t_1 = 0.0000010001 + 0.0000009999 = 2.0 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$$

отсюда:

$$V = \frac{(t_2 - t_1)}{(t_1 + t_2)} \cdot \vec{c} = 1.0 \cdot 10^{-4} \cdot c = 30 \text{ км/сек}$$

Конечно, в реальных условиях результаты эксперимента могут быть совершенно другими. При этом он должен отражать только составляющие абсолютной скорости Земли по направлению расположения световодной трубы.

### Список литературы

1. Крылов А.Н. Собрание трудов. Т.7. – М. - Л. Издательство Академия наук СССР, 1936.
2. Карякин Н.И., Быстров К.Р., Киреев П.С. Краткий справочник по физике. Издание третье. – М. Издательство «Высшая школа». 1969
3. Мамыров У.И. Классическая теория физики с дополненной соновой (начала современной классической теории физики). Бишкек. Илим. 2006.
4. Мамыров У.И. Некоторые проблемы при преобразовании координат. // Сб. тр. VII Всеакадемической школы по проблемам метрологического обеспечения и стандартизации. – М. ИВТАН. 1990.
5. Мамыров У. Аксиоматическая теория и этапы развития классической теории физики. // Научный журнал физика. г. Бишкек, 2024, №1. С. 24-30.

УДК 621.372:551.508.8

### СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА НАД РАЙОНАМИ НАЗЕМНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Орозобаков А.Т., Саякбаева Б. Б., Орозобаков Ж.А.

*Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР, 720071, Кыргызстан, Бишкек, пр. Чуй 265-а*

**Аннотация** В статье представлены общие содержания озона в течение года над северным Кыргызстаном и районами наземных микроволновых измерений российских партнеров по исследованию озонового слоя в рамках проектов МНТЦ. Сезонный ход рассчитан по данным инструментов OM/MLS спутника Ауга. В качестве примера показаны изменения общего содержания озона за предыдущий год. Как всегда максимум в средних широтах наблюдался в начале весны, минимум осенью.

**Ключевые слова:** озоновый слой, концентрация озона, миллиметровые волны, влажность, частота.

## SEASONAL VARIATIONS IN OZONE CONTENT OVER GROUND-BASED MICROWAVE MEASUREMENT AREAS

A.T. Orozobakov, B.B. Sayakbaeva, Zh.A. Orozobakov

*Institute of Physics named after J. Jeenbaev NAS KR, 720071, Kyrgyzstan, Bishkek, pr. Chui, 265-a*

The article presents the total ozone content during the year over northern Kyrgyzstan and the areas of ground-based microwave measurements of Russian partners in ozone layer research within the ISTC projects. The seasonal variation is calculated based on the data of the OMI/MLS instruments of the Aura satellite. As an example, changes in the total ozone content for the previous year are shown. As always, the maximum in the middle latitudes was observed in early spring, the minimum in autumn.

**Keywords:** *ozone layer, variation, ozone concentration, millimeter waves, humidity, frequency.*

**Введение.** Рассматриваемые в статье результаты расчетов общего содержания озона над некоторыми районами наземных микроволновых измерений являются продолжением совместных исследований с российскими партнерами [1-3]. Ранее в рамках проектов МНТЦ в течение десятка лет были проведены многократные совместные, одновременные измерения озонового слоя над несколькими районами. В данной статье даны сезонные вариации содержания озона над некоторыми из них, в качестве примера. В архивах обсерватории есть расчеты и над другими за последние лет двадцать. Независимо от тенденции к восстановлению озона мировым сообществом рекомендовано продолжать наблюдения за озоновым слоем желательно во всех широтах. В связи с чем действующая обсерватория им.проф. Орозобакова Т. на берегу оз. Иссык-Куль с радио спектральными аппаратами миллиметрового диапазона продолжают сбор данных по распределению озона. В данной статье представлены типичные вариации содержания озона по данным спутниковых измерений [4] рассчитанных по собственным программам. Вне зависимости от широты сезонный ход содержания озона наблюдается везде, с максимумом его концентрации весной и минимумом осенью. Обычно это связывают с переносом озона весной из тропических регионов в полярные, где он и накапливается. Летние уменьшения концентрации озона связаны с его фотохимическим распадом под воздействием солнечного света. Осенние минимальные значения наблюдаются из-за переноса озона обратно в тропики, а зимние увеличения происходят в связи с уменьшением фотохимических процессов и накоплением озона в полярных областях.

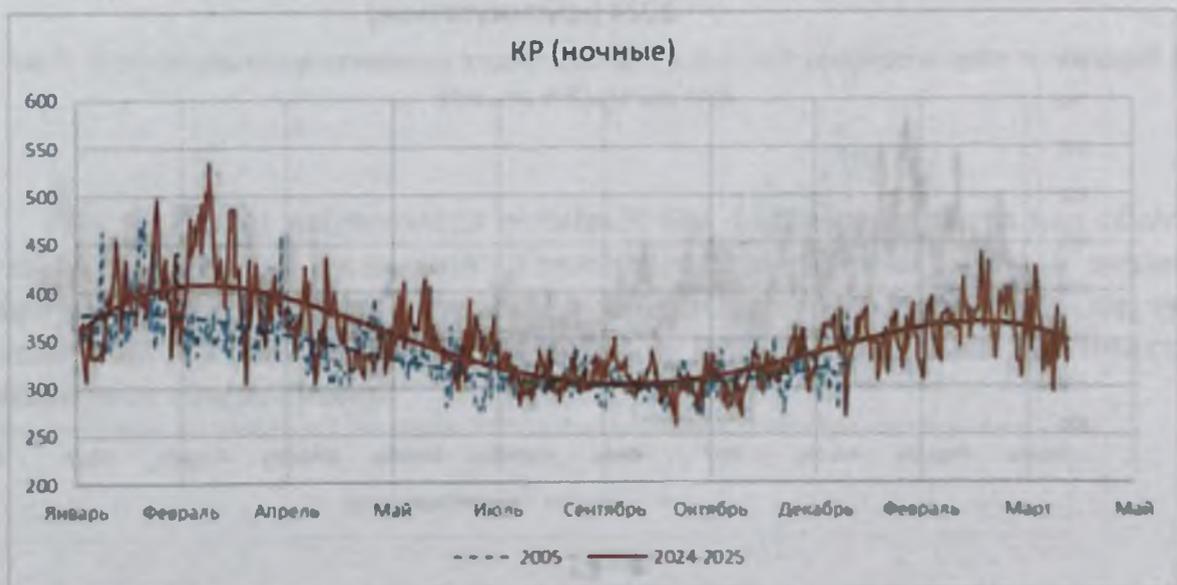
**Результаты подсчетов содержаний озона.** Наземные радиофизические наблюдения за озоновым слоем в обсерватории с целью верификации постоянно сравниваются с измерениями близлежащих наземных станций и спутниковыми данными. В каком виде предоставляются данные со спутника на сайтах подробно приведены в [5,6], фактически по предоставленным данным высотных распределений температуры, давления, влажности над исследуемым районом по специальным формулам, старым программам почти вручную

приходилось вычислять искомое высотное распределение озона. На данном этапе удалось несколько автоматизировать подсчеты. Ниже представлены некоторые готовые содержания озона в течение года, сезонный ход над двумя районами наземных микроволновых измерений России и Кыргызстана. В России кроме Апатитов партнеры проводят аналогичные измерения над Нижним Новгородом, Москвой и Томском, совместные измерения с ними проводились в рамках проектов МНТЦ, протоколов межправкомиссии и двусторонних договоров. Ниже на нескольких рисунках показан обычный сезонный ход общего содержания озона за предыдущий год и некоторые сравнения с вариациями озона в течение года двадцатилетней давности. Спутник Aura [4] был запущен в 2004 году и был рассчитан на десять лет, но после усовершенствований и в связи с необходимостью дальнейших исследований озонового слоя есть вероятность работы спутника еще лет десять. К тому времени наземные приборы пройдут достаточное подтверждение спутниковыми и эталонными инструментами, что позволит, в смысле верификации, успешно продолжать начатое.

Основные приборы, по данным которых вычисляются высотные распределения озона: MLS (Microwave Limb Sounder) - микроволновый радиометр для измерения концентрации химических соединений, ответственных за разрушения озона в различных слоях атмосферы, OMI (Ozone Monitoring Instrument) - спектрометр для измерения размеров отражённого и рассеянного в атмосфере солнечного излучения.

На рисунках 1 а, б представлены данные спутниковых измерений общего содержания озона в течение года в сравнении с 2005 годом. Где показания специально разделили на дневные и ночные, чтобы как-то различались слишком много данных на рисунках визуально. Рекомендованный сектор поиска пролетов над Кыргызстаном 40-46 с.ш. и 72-82 в.д.

а



6

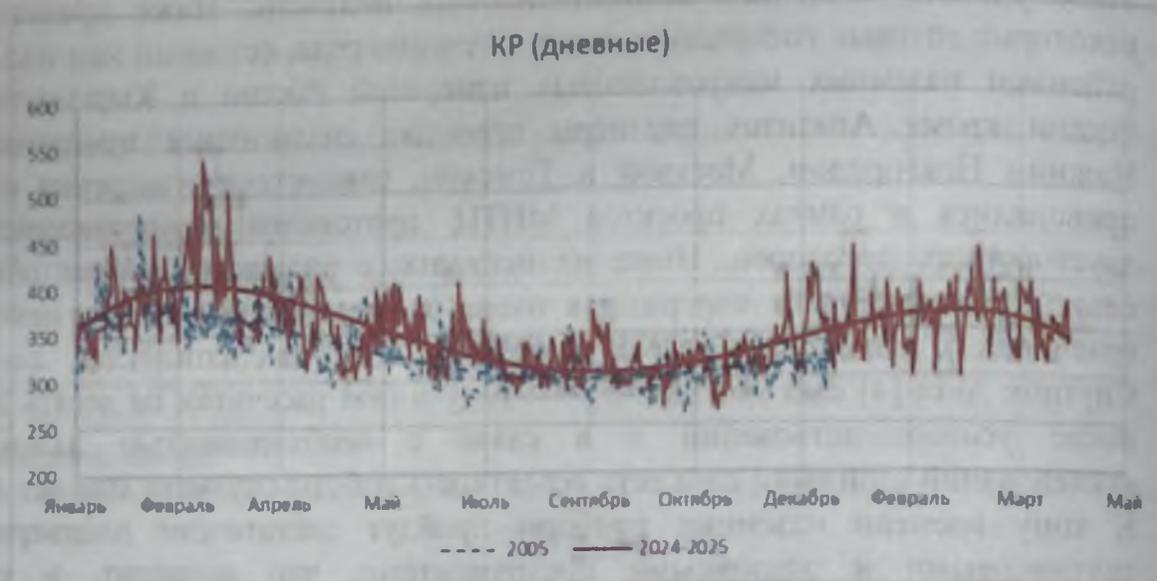
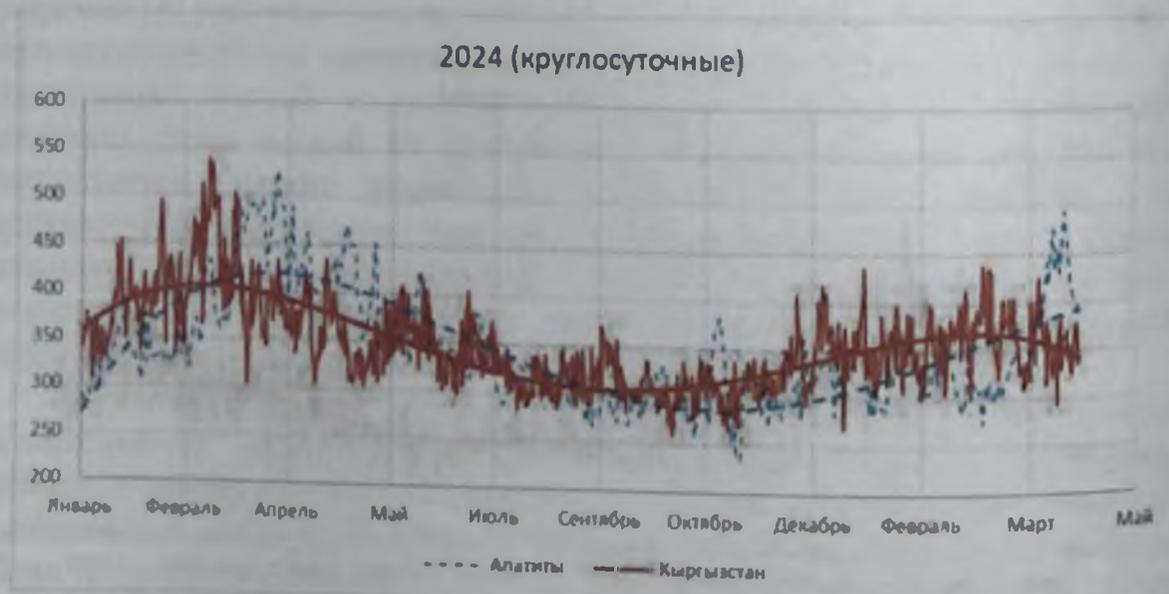


Рис.1. Данные инструментов спутника MLS Aura после перерасчетов по новым программам.

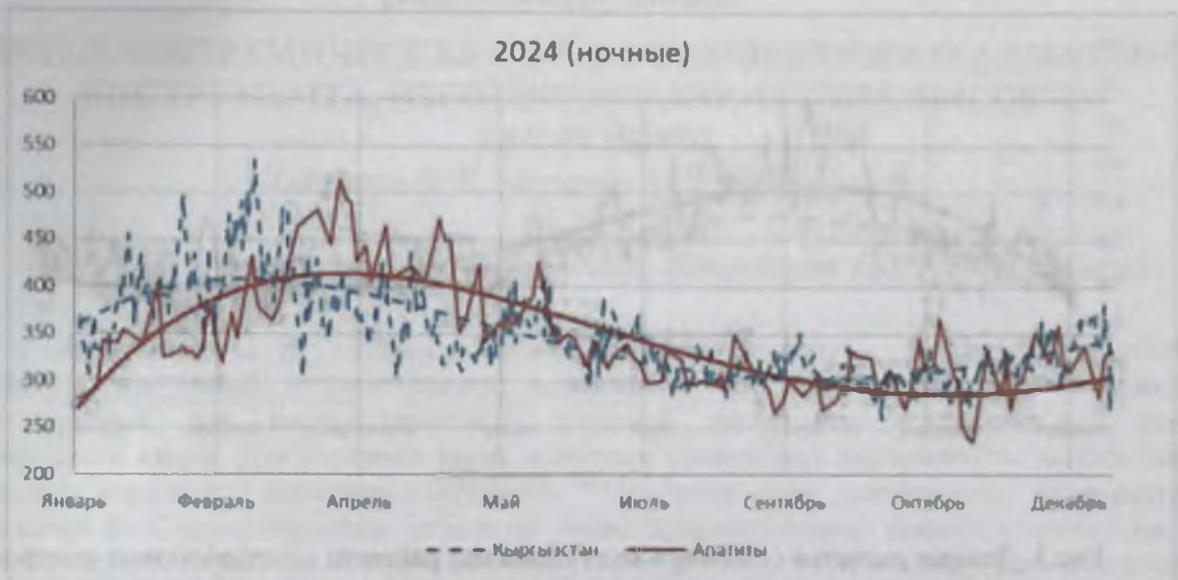
На рисунках видны, как было отмечено выше, увеличения содержания озона к концу зимы началу весны и уменьшения к осени. Также, все-таки, заметно восстановление озона по сравнению с двадцатилетней давностью.

Кроме расчетов содержания озона над Центральной Азией продолжены подсчеты озона над верхними широтами, где проводятся, аналогично кыргызским, микроволновые наземные измерения высотного распределения озона Рис.2а, б. над Кольским полуостровом г. Апатиты, над сектором пролетов спутника 67-68 с.ш. и 30-38 в.д.

а



6



В

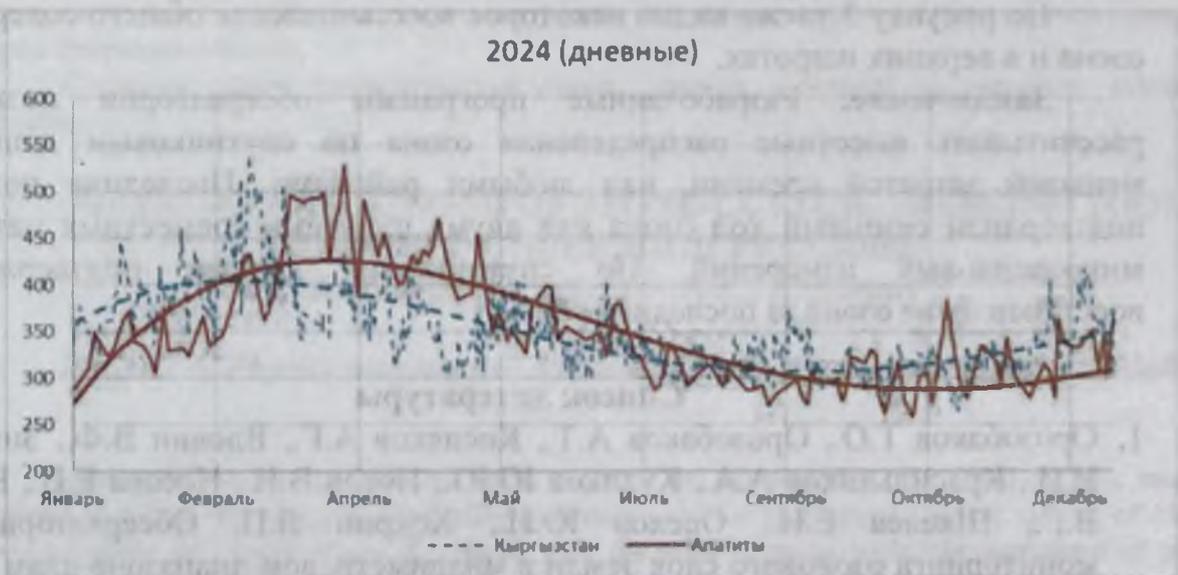


Рис.2. Данные расчетов сезонного хода озона над районами микроволновых измерений в России и Кыргызстане.

По рисункам наблюдается сезонный ход содержания озона над обоими пунктами наземных измерений. Увеличения, уменьшения озона в верхних широтах происходят с отставанием, это связано, как было отмечено выше, туда дальше добираться озону из тропиков, а также с влиянием арктических циклонов на севере России.

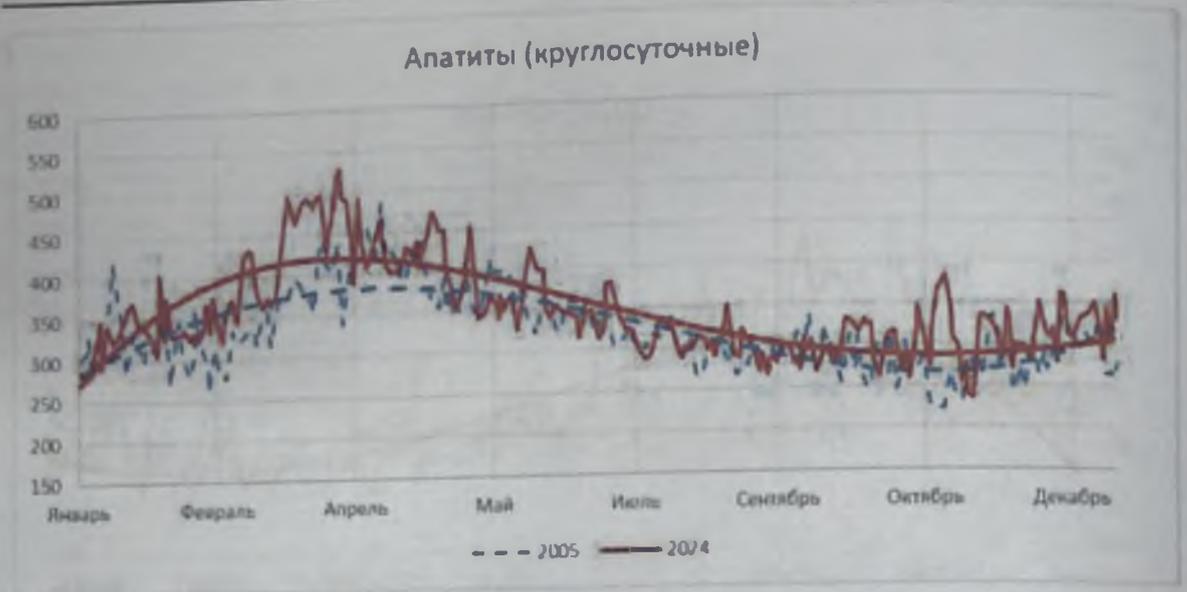


Рис.3. Данные расчетов сезонного хода озона над районом микроволновых измерений в России.

По рисунку 3 также видно некоторое восстановление общего содержания озона и в верхних широтах.

**Заключение.** Разработанные программы обсерватории позволяют рассчитывать высотные распределения озона по спутниковым данным с меньшей затратой времени, над любыми районами. Последние подсчеты подтвердили сезонный ход озона над двумя пунктами совместных наземных микроволновых измерений. По спутниковым данным подтверждается восстановление озона за последние годы.

#### Список литературы

1. Орозобаков Т.О., Орозобаков А.Т., Кисляков А.Г., Вдовин В.Ф., Зинченко И.И., Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Носов В.И., Носова Е.В., Рыскин В.Г., Шкелев Е.И., Орехов Ю.И., Хохрин Л.П. Обсерватория для мониторинга озонового слоя Земли в миллиметровом диапазоне длин волн в Среднеазиатском регионе. // Вестник ННГУ, Сер. Радиофизика, 2007, № 6, с. 44 – 51.
2. Орозобаков А.Т., Рыскин В.Г. Микроволновые наземные измерения суточных вариаций озона в верхней стратосфере над Киргизией // Известия РАН Физика атмосферы и океана, 2015, №1, том 51, с.88-95.
3. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Э.У. Наземные радиофизические наблюдения высотного распределения озона над регионом Средней Азии. //Журнал радиоэлектроники, Москва, 2018, №12, с.1-13.
4. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>.
5. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Э.У. Об измерениях озонового слоя. // Журнал «Физика» ИФ НАН КР, 2024, №1, стр.9-14.
6. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Ж.А. Высотное распределение озона над г. Бишкек по данным спутниковых измерений. // Журнал «Физика» ИФ НАН КР, 2024, №2, стр.69-79.

УДК536.453: 536.36

## МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКАЯ СВЯЗКА КАМНЕРЕЗНОГО АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА, ИЗГОТОВЛИВАЕМОГО ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Хайдаров Б. К., Арыков А. К., Хайдаров К.

*Институт физики имени академика Ж. Жеенбаева НАН КР, г. Бишкек*

**Аннотация.** В статье рассмотрены некоторые вопросы разработки металлокерамической матрицы(связки) композиционных алмазосодержащих материалов, применяемых для высокоскоростной дисковой распиловки высокотвердых пород природного камня. Для создания таких алмазных сегментных инструментов использована техника высокого “квазигидростатичного “ давления при повышенных температурах спекания. 1. Сформулированы основные типы взаимодействия алмаза с металлами в зависимости от характера межфазных процессов на границе металл-алмаз, типа и величины сил связи алмаза с металлом. Выделены три категории взаимодействия алмаз-металл при спекании композиционных алмазосодержащих материалов. Создана металлокерамическая связка на основе Ni и SiC алмазного инструмента для высокоскоростной распиловки твердых пород природного камня.

**Ключевые слова:** *синтетический алмаз, связка, алмазный инструмент, высокое давление.*

## METAL-CERAMIC BOND OF STONE-CUTTING DIAMOND TOOLS PRODUCED UNDER HIGH PRESSURE

Khaidarov B.K., Arykov A.K., Khaidarov K.

*Institute of Physics named after Academician Zh. Jeenbaev NAS KR, Bishkek*

**Abstract:** The article discusses some issues of the development of a metal-ceramic matrix (bundle) of composite diamond-containing materials used for high-speed circular sawing of high-hardness rocks of natural stone. To create such diamond segment tools, the technique of high “quasi-hydrostatic“ pressure at elevated sintering temperatures was used. 1. The main types of diamond-metal interaction are formulated depending on the nature of the interfacial processes at the metal-diamond interface, the type and magnitude of the diamond-metal bond forces. Three categories of diamond-metal interaction during sintering of composite diamond-containing materials are distinguished. A metal-ceramic binder based on Ni and SiC diamond tools for high-speed sawing of hard rocks of natural stone has been created.

**Keywords:** *synthetic diamond, binder, diamond tool, high pressure.*

**Введение.** Разработка и обработка горных пород для использования в стройиндустрии немислимы без применения алмазных инструментов. Анализ структуры себестоимости обработки природного камня показывает, что наиболее дорогой операцией является технологический процесс резки на плиты и бруски, составляющей 40-45% общих затрат.

Алмазный инструмент по существу это композиционный алмазосодержащий материал инструментального назначения (КАМИН), где

один из компонентов выполняет роль матрицы (связка), а другой (кристаллы алмаза) является равномерно распределенной дисперсно-упрочняющей фазой. При создании КАМИН наиболее целесообразно использования жидкофазного спекания. Однако такая схема требует использование высокой температуры, что на практике трудно ее реализовать из-за недостаточной термостойкости кристаллов синтетического алмаза (СА). Высокую пластичность металлической связки можно достичь, если для создания КАМИН использовать высокие давление ( $p$ ) и температуру ( $T$ ), но ниже реальной температуры плавления.

Использование высоких давлений в изготовлении КАМИН позволяет осуществить упрочнение закрепления алмазных кристаллов в матрице КАМИН из-за большого различия их коэффициентов термического расширения и сжимаемости. При воздействии высоких  $p$  и  $T$  на брикет, состоящего из порошкообразной металлической матрицы и кристаллов алмаза, на первоначальном этапе воздействий  $p$  и  $T$  происходит сжатие брикета, устраняющее имеющихся пор, а в дальнейшем - за счет большой пластической деформации металлической фазы должна образоваться некая монолитная масса матрицы вокруг алмазных кристаллов, что приводит к всестороннему их обжатию. Охлаждение спеченной композиционной системы «металлическая (металлокерамическая) матрица-алмаз» за счет большой разницы между величинами коэффициентов линейного расширения алмаза и металлической матрицы ведет к дальнейшему сильному обжатию алмаза.

В статье рассмотрены некоторые аспекты разработки металлокерамической связки для создания КАМИН, используемых для распиловки природного камня, с применением техники высокого давления при повышенных температурах.

**Физико-химическое взаимодействие синтетического алмаза (СА) с металлами и сплавами, используемыми для создания КАМИН.** Физико-химические процессы, протекающие при спекании КАМИН под высокими давлениями, играют важную роль для достижения сильного удержания алмазных зерен в инструменте.

Многообразие составов металлических связок, эксплуатационных свойств СА и технологических способов изготовления алмазного инструмента к настоящему моменту не позволило ученым создать единую теорию по составу металлической связки. Общее правило заключается в том, чтобы алмазно-металлический композит работал в режиме самозатачивания. Большинство металлических связок не взаимодействует с поверхностью алмаза и закрепление алмазных зерен происходит в основном за счет сил механического воздействий. Поэтому на основе не адгезионно-активных по отношению к алмазу металлов невозможно создать эффективные, износостойкие алмазные инструменты.

Под адгезионным закреплением алмазных зерен в металлической матрице подразумевают такое закрепление, при котором осуществляется не только механическое защемление, а также реализуется химическая связь поверхности кристаллов алмаза с материалом матрицы. Для реализации высокой адгезии должны выполняться следующие условия: 1) хорошая физико-химическая связь

между материалами алмазно-металлической композиции, другими словами – высокое сродство металлической связки к поверхности СА; 2) совершенный контакт соединяемых компонентов композиций. Последнее условие может реализоваться в полном объеме, когда основной материал матрицы находится в жидком, высокопластичном, т.е. в текучем состоянии. Это значит, что адгезия и смачиваемость расплавов в жидком состоянии к поверхности кристаллов алмаза подробно рассмотрены в [1÷4]. В этих работах было показано, что природа сил связи является определяющей в формировании основных закономерностей вышеуказанных явлений.

При создании КАМИН нами ранее была использована технология горячего допрессования в отсутствие жидкой фазы [5,6]. В таком технологическом процессе осуществляется твердофазное взаимодействие металлической связки с кристаллами алмаза.

Свойства твердофазового контактного взаимодействия алмаза со сплавами Ni и Cu, которые предварительно были легированы карбидообразующими металлами, рассмотрены в [7].

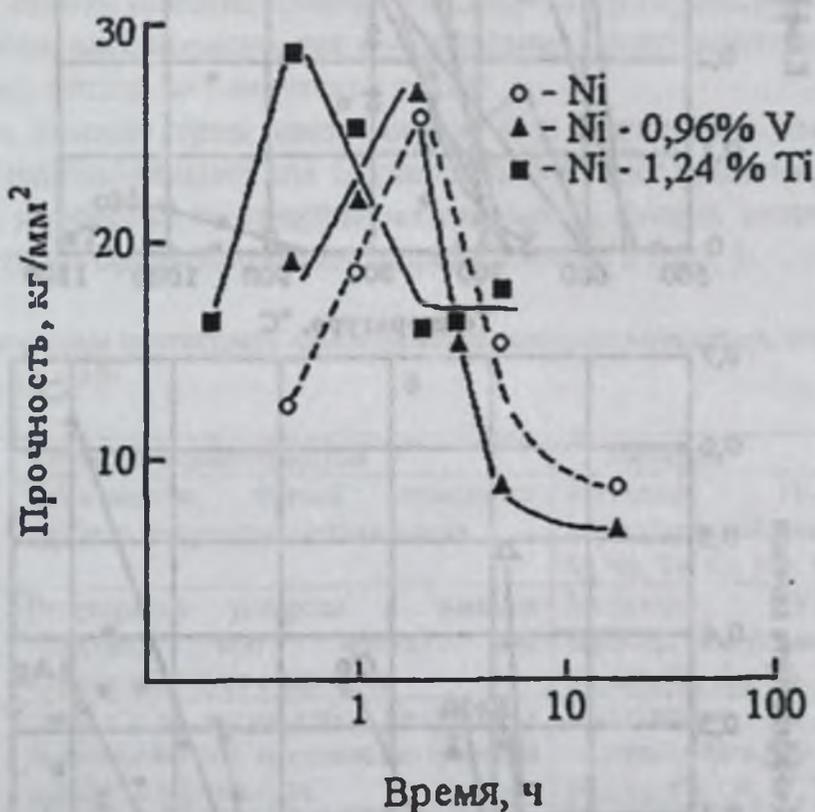


Рис. 1. Прочность связи Ni – алмаз в зависимости от карбидообразующих элементов (V, Ti) и времени выдержки.

Для этой цели авторы [7] подвергали горячему прессованию поверхности (111) природных монокристаллов алмаза в вакууме при давлении 58 МПа для сплавов Ni и 36 МПа – при температуре 800°С. Контактную прочность на срез определяли при комнатной температуре после охлаждения образцов. Влияние карбидообразующих металлов (Ti, V) и времени выдержки на контактную прочность системы Ni – алмаз представлено на рис.1. Видно, что зависимость

контактной прочности от времени выдержки (спекания) носит пикообразный характер. Взаимодействие никелевых сплавов с алмазами носит сложный характер, однако природа этого явления неясна [7].

Зависимость коэффициента адгезии металлов к алмазам  
 а - от температуры, °С; б - от относительной температуры ( $T/T_{пл}$ ),

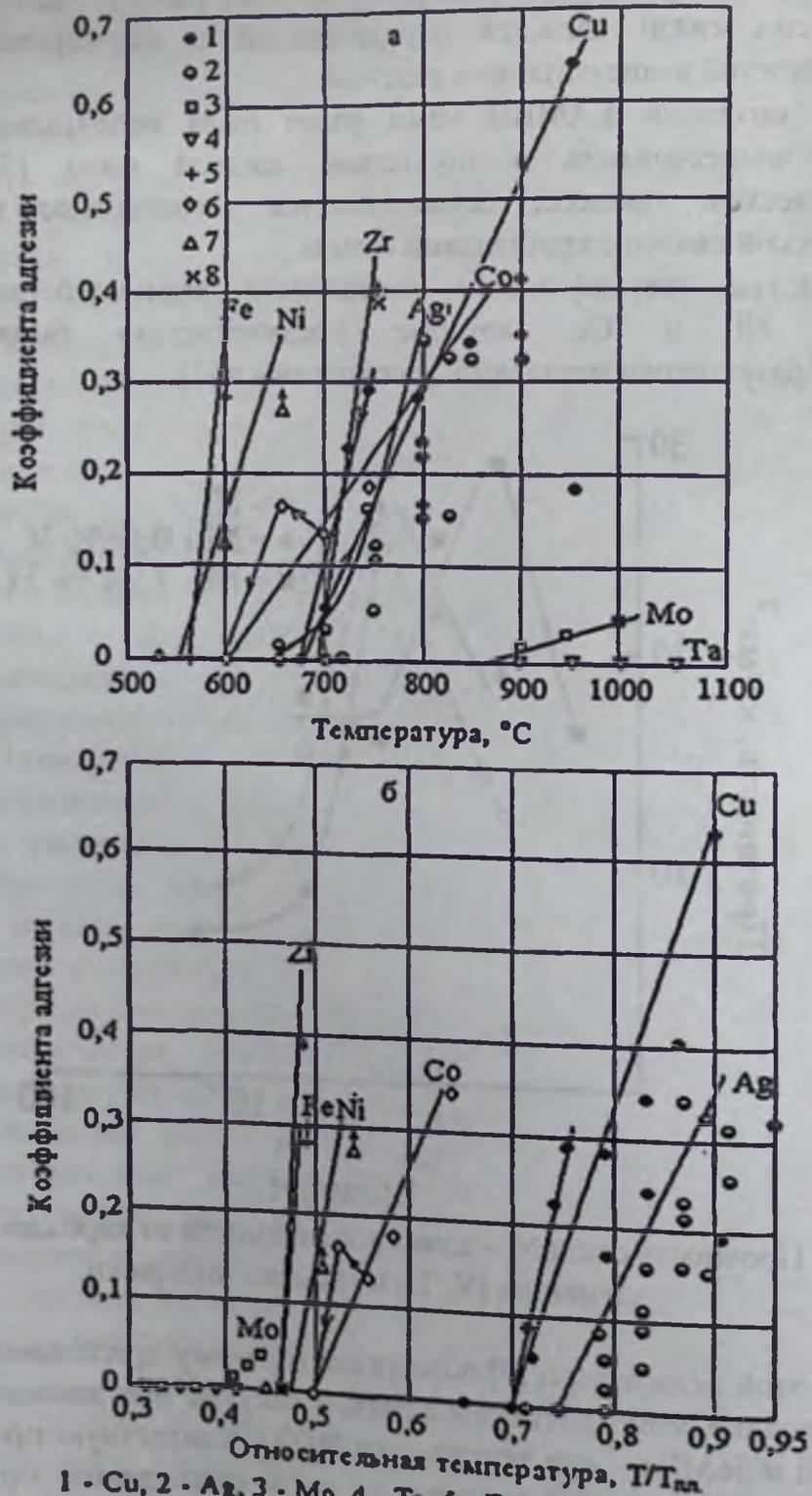


Рис. 2. Коэффициент адгезии металлов к алмазам в зависимости от  $T$ , °С (а) и от  $T/T_{пл}$  (б).  
 1 - Cu, 2 - Ag, 3 - Mo, 4 - Ta, 5 - Fe, 6 - Co, 7 - Ni, 8 - Zr

Экспериментальные данные адгезионных испытаний для некоторых материалов представлены на рис.2 [7]. Данные этого рисунка показывает, что при представлении полученных результатов параметров коэффициента адгезии в зависимости от относительной температуры  $T/T_{пл}$ , испытанные металлы можно разделить на две разные группы(рис.2б).

К I-группе, характеризующейся относительно низкими температурами начала адгезионной связи 0,4-0,5  $T_{пл}$ ., относятся химически взаимодействующие с углеродом элементы. Ко II-группе относятся металлы химически инертные к углероду. Это металлы подгруппы IV периодической системы: Cu, Ag. Они обладают более высокими  $T$  начала адгезии к алмазу, равными  $0,7T_{пл}$ .

**КАМИН на основе никеля и карбида кремния.** Из приведенных фактов вытекает важный вывод о том, что повышение прочности закрепления режущих алмазных кристаллов в КАМИН приводит к увеличению их абразивной стойкости. А это в свою очередь повышает эффективность КАМИН инструмента при его использовании на практике. Алмазоудержание в КАМИН при использовании высоких давлений и температур осуществляется как за счет механического, адгезионного, так и – сочетания адгезионного и механического закрепления в металлокерамической связке.

Самые важные типы связи алмаза при контактном взаимодействии с металлами, используемыми для создания КАМИН в зависимости от характера межфазных процессов на границе металл-алмаз, типа и величины сил связи алмаза и металла сформулированы и представлены в табл. 1.

Таблица 1- Категории контактного взаимодействия алмаза с металлами, используемыми при изготовлении КАМИН

Категория	Характер взаимодействия	Металлы
I	Образование тонкой прослойки карбида на границе металл-алмаз	Металлы IV-VI группы периодической системы: Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, а также Si, B.
II	Растворение углерода в жидком металле, сам металл не взаимодействует с алмазом.	Металлы VIII группы периодической системы элементов: Fe, Co, Ni, Cu, Rh, Pd, Os, Ir, Pt
III	Отсутствие каких-либо химических взаимодействий, постоянство границы раздела металл-алмаз.	Инактивные по отношению к углероду металлы: Cu, Au, Ag, Cd, Hg, Sn, Pb, Ge, Bi, Se, Te, Po

Бугаков В.И. и др. для изготовления алмазного камнерезущего инструмента разработали новый тип связок на основе никеля, легированного диборидами хрома (CrB<sub>2</sub>) и титана (TiB<sub>2</sub>) [8,9]. Они для этой цели использовали метод горячего прессования при  $T=1050^{\circ}\text{C}$  под высоким давлением 1,5 ГПа. На основании рентгенофазового анализа было показано, что при этих условиях в исследованных системах кроме механического закрепления образуется дополнительно адгезионное закрепление алмазных зерен [8,9].

При разработке металлокерамической связки КАМИН, создаваемого под действием высокого давления, нами за основу была выбрана композиция на основе Ni, которая широко применяется при изготовлении алмазного инструмента из синтетических алмазов. При этом учитывались вышеуказанные требования к связкам по алмазоудержанию. В пользу такого выбора также говорят результаты экспериментов, приведенные на рис.1 и 2, в табл.1 и опубликованные исследования [7-9]. В качестве легирующего компонента был выбран карбид кремния (SiC) зеленый. Низкая термостойкость СА предопределяет температуру спекания их с металлокерамической связкой даже при высоких давлениях 1-1,2 ГПа не выше 1100°C. Как показано в [8,9] в системе Ni-CrB2 (TiB2) при этих температурах образуется жидкая фаза, что является основой для активного процесса спекания.

Использованный в данной работе в качестве легирующего компонента SiC (зеленый) обладает высокой твердостью, которая должна привести к увеличению объемной твердости и износостойкости КАМИН. С другой стороны, как видно из табл.1, свободный Si является адгезионно-активным элементом по отношению к углероду, поэтому он обладает свойством образовывать карбидную фазу (SiC) на поверхности алмаза, а SiC имеет очень прочную ковалентную силу связи. Все это в совокупности приводит к увеличению химической связи алмазного кристалла с матрицей и – повышению алмазоудержания в КАМИН.

Физико-технические характеристики выбранных нами материалов связки для создания опытных КАМИН для распиловки природного камня представлены в табл.2.

Таблица 2 - Физико-технические характеристики материалов для изготовлений опытных образцов КАМИН

Материал порошки	Марка	$T_{пл}^{\circ}C$	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Размер частиц, мкм	ГОСТ, ТУ
Никель	ПНК-УТ1, ПНК-ОС-1	1453	8,9	3,0÷3,5 3,0÷3,5	<20,0 <20,0	9722-97 Минск
Карбид кремния (зеленый)	64С, 63С	>2700	3,22	1,7÷1,35	<10,0	26327-84,М.-1994

С целью использования СА для изготовления КАМИН, применяемых в камнеобработке, нами освоена технология их создания в условиях высокого «квазигидростатического» давления до 1÷1,5ГПа. Данная технология разработана в ИФВД РАН для использования поликристаллов СА «карбонадо» и других алмазных материалов в камнеразрушающих инструментах [10-12]. Технологический процесс создан на базе гидравлического пресса для синтеза и спекания сверхтвердых материалов ДО-043 усилием 20МН (2000 т.с.).

Для спекания КАМИН при высоких р и Т, пригодных для дисковой распиловки высокотвердых пород природного камня, были использованы СА

фирмы Де Бирс серии SDB зернистостью 50/60 – 30/40 mesh (~300/250 – ~600/400 мкм). Эти алмазные порошки высококачественные, обладают достаточно хорошими термостойкими свойствами и они применимы для высокоскоростной распиловки твердых пород природного камня, например, гранита, габбро, сиенита, окварцованного мрамора и др.

Выбор этих компонентов для разработки металлокерамической связки позволит:

1) спекать КАМИН при температуре ~1050<sup>0</sup>С под давлением 1-1,2ГПа. В этих условиях в композиционной системе, содержащей Ni, образуется жидкая фаза [8, 9,12];

2) повысить износостойкость алмазного инструмента вследствие наличия в связке SiC.

Особо следует отметить, что в формировании композиции «металл связки – алмазные кристаллы» чрезвычайно важно соблюдение соответствие прочности режущих алмазных зёрен со способностью алмазоудержание связки, а также износа зерна и связки.

Алмазные кристаллы в инструменте во время внедрения в материал разрушаемого природного камня подвергаются действиям различных механических нагрузок. При этом, в основном, возможны следующие механизмы смещения алмазного кристалла: в области упругой и пластической деформации. Как показывает практическое применение алмазного инструмента при реализации механизма работы алмазного кристалла в области упругой деформации является поверхностным, а появление пластической деформации связки в контактной зоне кристалла алмаза, как правило, приводит к уменьшению алмазоудержания и выпадению зерна в процессе резки природного камня. По этим причинам введение в состав разрабатываемой металлокерамической связки SiC ограничено в допустимых пределах. Добавление карбида кремния в малой концентрации не способно к предотвращению возникновения пластической деформации связки в прилегающей зоне к алмазному зерну. Чрезмерное увеличение концентрации SiC в связке приводит к сильному охрупчиванию связки, что может привести к преждевременному разрушению алмазного инструмента при сильных механических нагрузках.

Экспериментальные работы по изготовлению опытных образцов КАМИН в режиме отработки технологического процесса велись непосредственно в производственных условиях ОАО «Кыргыз Тоо-Таш (г. Токмок) на прессовом оборудовании ДО - 043 усилием до 20 МН. Для спекания опытных алмазных инструментов использовалась металлокерамическая связка МКН2, состоящая из никеля и карбида кремния зеленого. Опытные алмазные сегменты показаны на рис. 3.



Рис.3. Спечённые при высоких давлениях и температурах опытные алмазные сегменты.

#### Выводы:

Предложена перспективная технология создание КАМИН для камнерезки при высоком “квазигидростатическом” давлении и повышенной температуре.

#### Литература

1. Ножкина А. В., Отопков П. П. Смачивание алмаза марганцем, германием, оловом и свинцом. //Алмазы. -1971.№5.-С.1-2
2. Найдич Ю. В., Колесниченко Г.А., Колесниченко Г.А., Лавриненко Н.А., Мошак Я. Ф. Пайка и металлизация сверхтвёрдых инструментальных материалов. – Киев. Наукова думка.1977, -188
3. Motimer D.A., Nicolas M. The wetting of carbon and carbides by copper alloys//Journals of material science.-9733, №8, P.640-648.
4. Evans S.D., Nicolas M., Scott P.M. The wetting and bonding of diamonds by copper titanium alloys// Ind. Diamond ran. 1977.-019-P.306-309.
5. Хайдаров К., Арыков А. К. Послойноупрочнённый композиционный алмазосодержащий материал для строительной индустрии // Вестник КНУ. 2003.-С. 251-255.
6. Хайдаров К., Арыков А. К. Металлическая связка алмазного инструмента на основе Fe, Ni и бронзы с добавлением Si, Ti для резки гранита. XIV Международная научная конференция «Физика твёрдого тела, функциональные материалы и новые технологии», 1-4 августа 2018 г. С. 184-187
7. Dewar B., Nicolas M., Scott P. M. The solidthase bonding of copper, nickel and some of their alloys to9 diamonds //journals of material science, 976, N1, P 1083-1090.
8. Бугаков И.И., Елюгин А. В., Караваев К.М. и др. Новый тип связок на основе никеля, легированного деборидами титана и хрома для алмазного камнеудержающего инструмента. //Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. -1998, №5 –С.6-8.
9. А.С. №1600364. Связка для изготовления инструмента.//Бугаков В. И., Довбня А. В., Коняев Ю. С.. -1999г.

10. А.С. №730473. Способ изготовления сборного алмазного инструмента.// Довбня А. В., Конаев Ю.С., Орлов В.И., Бугаков В. И. и др. -1980г.
11. Патент РФ №1192955. Способ изготовления алмазного инструмента. //Бугаков В.И.,Довбня А.В., Коняев Ю.С. 1985г.
12. Бугаков В. И., Коняев Ю.С. Высокоэффективный алмазный инструмент, изготовленный по оригинальной технологии с применением высоких давлений и температур, новых связок и алмазных материалов. //Сверхтвердые материалы. -2008 №6.-С. 23-27.

УДК 535 37.

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ $\text{LiNaSO}_4$ И $\text{LiKSO}_4$ АКТИВИРОВАННЫЕ ИОНАМИ ХРОМА

Ганыева А.С.,

*Кыргызский национальный университет им. Ж.Баласагына, г. Бишкек,  
Кыргызская Республика. E-mail: [gainagul1974@gmail.com](mailto:gainagul1974@gmail.com)*

**Аннотация:** Исследована термолюминесценция кристаллов  $\text{LiNaSO}_4$  с примесью  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{LiKSO}_4$  с примесью  $\text{Cr}^{6+}$ . В спектрах стимулированной термолюминесценции кристаллов наблюдаются термомаксимумы при 350К и 380К для кристалла  $\text{LiNaSO}_4$  с примесью трехвалентного хрома и термомаксимумы при 325-335, 375- 385, и 410-420 К для кристаллов  $\text{LiKSO}_4$  с примесью шестивалентного хрома.

**Ключевые слова:** кристалл, примесь, люминесценция, термопик, дефект.

## Luminescence of $\text{LiNaSO}_4$ and $\text{LiKSO}_4$ crystals activated by chromium ions Ganyeva A.S.

*Kyrgyz National University named after. Zh. Balasagyn, Bishkek, Kyrgyz Republic.  
E-mail: [gainagul1974@gmail.com](mailto:gainagul1974@gmail.com)*

**Abstract:** The thermoluminescence of  $\text{LiNaSO}_4$  crystals with a  $\text{Cr}^{3+}$  admixture and  $\text{LiKSO}_4$  with a  $\text{Cr}^{6+}$  admixture was studied. In the spectra of stimulated thermoluminescence of crystals, thermal maxima are observed at 350 K and 380 K for the  $\text{LiNaSO}_4$  crystal with an admixture of trivalent chromium and thermal maxima at 325-335, 375-385, and 410-420 K for  $\text{LiKSO}_4$  crystals with an admixture of hexavalent chromium.

**Key words:** crystal, impurity, luminescence, thermal peak, defect.

**Введение.** Среди огромного разнообразия кристаллов, которые применяются в различных областях науки техники особое место занимают ионные кристаллы, которые находят все большее применение. Они используются в оптических квантовых генераторах и усилителях, для изготовления призм и линз в инфракрасной спектроскопии, дозиметров ионизирующих излучений и т.д.

Использование ионных кристаллов в основном связано с наличием в них дефектов кристаллической структуры. Существуют много различных способов создания дефектов в кристаллической решетке, но наиболее важными из них является введение примесей в кристаллы и облучение и их ионизирующим излучением.

Определенный интерес в этом плане могут представлять сложные сульфаты щелочных металлов, такие как  $\text{LiNaSO}_4$ ,  $\text{LiKSO}_4$  и  $\text{KNaSO}_4$  в качестве рабочих веществ для термолюминесцентной дозиметрии, поскольку они обладают эффективным атомным номером близким к эффективному атомному номеру биологической костной ткани и достаточно высоким световыходом [1].

Свойства облученных кристаллов  $\text{LiKSO}_4$  и  $\text{LiNaSO}_4$  исследованы в работе [1-5]. В этих работах исследованы появление парамагнитных центров в облученном кристалле. Вместе с этим исследовано влияние примеси в образовании ион- радикалов в облученном кристалле.

**Термолюминесценция в кристаллах  $\text{LiKSO}_4$ .** Результаты измерений кривых ТСЛ беспримесных кристаллов  $\text{LiKSO}_4$  и кристаллов  $\text{LiKSO}_4\text{-CrO}_6^{2-}$  в интервале температур 293- 500 К приведены на рис.1.,2. Кристаллы были подвергнуты рентгеновскому облучению в течении одного часа на установке УРС-70,  $U= 55$  кВ,  $I=10$  мА. Как в беспримесном кристалле (кривая 1), так и в кристалле  $\text{LiKSO}_4\text{-CrO}_6^{2-}$  (кривая 2) наблюдаются максимумы термолюминесценции при 325-335, 375- 385, и 410-420 К [2].

Отношение относительных интенсивностей кристалла с примесью к интенсивности беспримесного кристалла дает во сколько раз увеличилась интенсивность после введения примеси  $\text{CrO}_6^{2-}$ . Для первого пика интенсивность увеличивается 2,02 раза, во втором пике оно увеличивается 3,7 раз.

В примесных кристаллах  $\text{LiKSO}_4\text{-CrO}_6^{2-}$  ионы  $\text{Cr}^{6+}$ , которые являются ловушками для электронов создают дополнительные условия способствующие увеличению образования ион- радикалов  $\text{SO}_4^-$ . В свою очередь ионы хрома переходят в другие зарядовые состояния, что наблюдается в эксперименте.

**Термолюминесценция в кристаллах  $\text{LiNaSO}_4$ .** Согласно данным [1] в спектрах термолюминесценции как беспримесного, так и содержащего примесь хрома кристаллов  $\text{LiNaSO}_4$  наблюдаются два термопика, расположенных около 350 и 390 К. При одинаковых условиях облучения и регистрации интенсивности термолюминесценции примесного кристалла намного выше, чем беспримесного (рис.3). Исследование изотермического затухания свечения при температурах, соответствующих максимумам термопиков, показало, что затухание свечения подчиняется экспоненциальному закону. Энергия активации, соответствующая каждому термопику определяется по формуле

$$E = 2,52 \frac{kT_M}{\omega} - 2kT_M$$

$T_M$ - температура максимума термопика;  
 $\omega$ - его полуширина.

Вычисления по этой формуле энергии активации оказались равными 0,63 эВ для термопика 350 К и 0,95 эВ для термопика при 390 К.

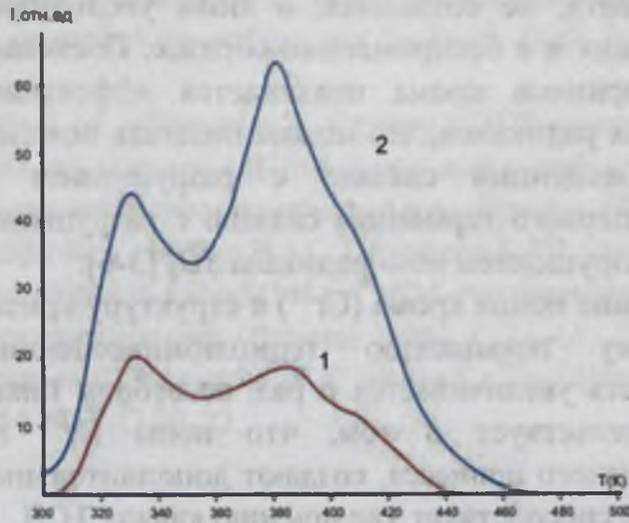


Рис.1. Спектры ТСЛ кристаллов  $\text{LiKSO}_4$  (кривая 1) и кристаллов  $\text{LiKSO}_4\text{-CrO}_6^{2-}$  (кривая 2).

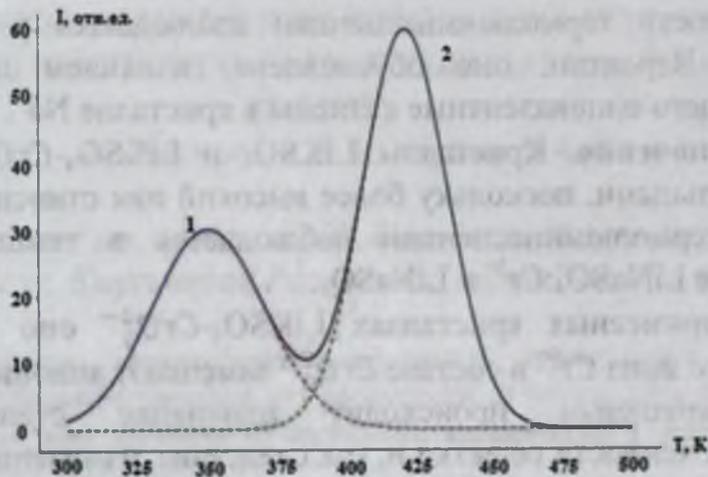


Рис.2 Разложение кривой термолюминесценции облученного (1ч) кристалла  $\text{LiKSO}_4$  на составляющие (1,2).

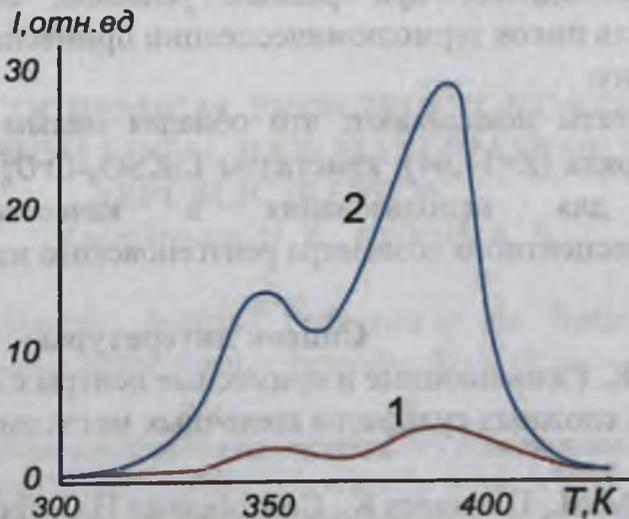


Рис.3. Спектры ТСЛ кристаллов  $\text{LiNaSO}_4$  (кривая 1) и  $\text{LiNaSO}_4\text{:Cr}^{3+}$  (кривая 2)

Отсутствие дополнительных пиков на кривой термолюминесценции примесного кристалла свидетельствует о том, что при введении примеси новые уровни захвата, не создаются, а лишь увеличивается количество ловушек, существующих и в беспримесном образце. Поскольку как показано выше, при введении примеси хрома повышается эффективность образования серно-кислородных радикалов, что можно полагать появление термопиков на кривых термолюминесценции связано с разрушением именно этих радикалов. Появление первого термопика связано с разрушением ион радикала  $SO_4^-$ , а в второго с разрушением ион-радикала  $SO_2^-$  [3-6].

Введение ионов хрома ( $Cr^{3+}$ ) в структуру кристаллов  $LiNaSO_4$  приводит к постепенному повышению термолюминесценции. Для первого пика интенсивность увеличивается в 6 раз, во втором пике оно увеличивается в 7 раз. Это свидетельствует о том, что ионы  $Cr^{3+}$  играют роль активаторов люминесцентного процесса, создают дополнительные ловушки для электронов и дырок, что способствует увеличению канала ТСЛ.

Сравнивая отношение относительных интенсивностей в кристаллах  $LiKSO_4$  и  $LiNaSO_4$  можно сказать, что, наиболее заметное повышение интенсивности термолюминесценции наблюдается у примесного кристалла  $LiNaSO_4$ . Вероятно, она обусловлена влиянием примесного иона  $Cr^{3+}$ , замещающего одновалентные катионы в кристалле  $Na^+$ .

**Выводы.** Кристаллы  $LiKSO_4$  и  $LiKSO_4-CrO_6^{2-}$  являются наиболее чувствительными, поскольку более высокий пик относительной интенсивности спектра термолюминесценции наблюдается в температуре ниже чем у кристаллов  $LiNaSO_4:Cr^{3+}$  и  $LiNaSO_4$ .

В примесных кристаллах  $LiKSO_4-CrO_6^{2-}$  оно обусловлено влиянием примесного иона  $Cr^{6+}$  в составе  $CrO_6^{2-}$  замещают анионные комплексы  $SO_4^-$ . При таком замещении происходит изменение степени дефектности и разупорядоченности решетки и, как следствие, изменение динамики [5].

Следует отметить, что сравнение кривых ТСЛ беспримесных кристаллов и с примесью ионов хрома обнаруживает их некоторое сходство в позициях пиков ТСЛ. Однако, при равных условиях облучения и регистрации интенсивность пиков термолюминесценции примесного кристалла выше чем у беспримесного.

Результаты показывают, что обладая малым значением эффективного атомного заряда ( $Z=11,64$ ), кристаллы  $LiKSO_4-CrO_6^{2-}$  и ( $Z=11,6$ )  $LiNaSO_4:Cr^{3+}$  пригодны для использования в качестве рабочего вещества термолюминесцентного дозиметра рентгеновского излучения.

#### Список литературы

1. Шаршеев К. Радиационные и примесные центры с переменной валентностью в кристаллах сложных сульфатов щелочных металлов. Екатеринбург- Каракол: 1989, 208с.
2. Кидибаев М.М., Шаршеев К., Солтобекова Н.С. Люминесцентные свойства монокристаллов  $LiKSO_4$  легированных ионами шестивалентного хрома //

- Сборник трудов Иссык-Кульской международной- школы конференции по радиационной физике твердого тела SCORPH-2015 .2-8 августа 2015 г. с.50-52.
3. Alybakov A.A., Bujko V.M., Sharsheev K. Optical absorption spectra of  $Cr^{3+}$  ions in  $LiNaSO_4$  and  $LiKSO_4$  crystals // Cryst.Res. and Technol. 1982, В 17, № 9. -Р. k92-k94
4. Алыбаков А.А., Буйко В.М., Шаршеев К. Спектры ЭПР и оптического поглощения облученных кристаллов  $LiKSO_4$  с примесью трехвалентного хрома //Физические свойства диэлектрических кристаллов. Фрунзе, 1983. С.29-37.
5. Акчалов Ш., Алыбаков А.А., Буйко В.М., Шаршеев К.Ш. Электронные спектры облученных кристаллов  $LiNaSO_4: Cr^{3+}$  //Магнитооптические свойства некоторых комплексных соединений. -Фрунзе, 1984. С.33-46.
6. Алыбаков А.А., Шаршеев К. Спектры ЭПР ионов  $Cr^{3+}$  в  $LiNaSO_4$  и  $LiKSO_4$  // Изв. АН Кирг ССР. 1984. №3. С.20-22.

УДК 666.65

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОГНЕУПОРОВ ИЗ МЕСТНОГО СЫРЬЯ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ (ОБЗОР)

Касмамытов Н. К., Куйкеев А. Б.

*Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева Национальной Академии  
Наук, Кыргызской Республики, город Бишкек*

**Аннотация.** Развитие производства огнеупорных керамических материалов из местного сырья имеет большое значение для республики. В основу данной научной статьи положено производство жаропрочного огнеупорного керамического изделия из местного сырья.

**Ключевые слова:** огнеупоры, огнеупорные изделия, неформованные огнеупоры, корундовый, магнезиальный, доломитовый, хромистый кварцевый или динасовый экзотермический синтез, связующее, огнеупорность, термостойкость, муллит, шамотного кирпича.

## PHYSICOCHEMICAL PRINCIPLES OF OBTAINING REFRACTORIES FROM LOCAL RAW MATERIALS OF THE KYRGYZ REPUBLIC (REVIEW)

Kasmamytov N. K., Kuikееv A. B.

*Academician J.Jeenbaev Institute of Physics of the National Academy of  
Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek city*

**Annotation:** The development of production of refractory ceramic materials from local raw materials is of great importance for the republic. This scientific article is based on the production of heat-resistant refractory ceramic products from local raw materials.

*Key words: refractories, refractory products, unshaped refractories, corundum, magnesium, dolomite chromium quartz or dinas exothermic synthesis, binder, fire resistance, heat resistance, mullite, fireclay brick.*

### Введение

Огнеупорная керамика появилась как результат многовекового развития технологий обработки глины и других минералов, устойчивых к высоким температурам.

В настоящее время огнеупорные материалы применяется:

-Металлургия: футеровка доменных печей, конвертеров, сталеразливочных ковшей (70% потребления);

-Цементная промышленность: облицовка вращающихся печей для обжига клинкера;

-Стекольная промышленность: кладка плавильных печей;

-Энергетика: футеровка котлов ТЭЦ;

-Химическая промышленность: изготовление аппаратов, устойчивых к агрессивным средам.

Сырьем для изготовления огнеупорных видов кирпичной продукции служат в основном горные породы с огнеупорностью не меньше 1580 °С, а также возвращенные в технологический процесс мелкоизмельченные бракованные изделия, неформованные материалы, отходы. Огнеупорные керамические материалы обладают необходимыми свойствами, позволяющие решить проблему экономии материальных и энергетических ресурсов, они применяются в различных отраслях промышленности, металлургии, машиностроении, химической и строительной отрасли.

### Огнеупорные материалы и их свойства. Классификация огнеупоров

**Огнеупоры (refractories)** - материалы и изделия, изготовленные преимущественно из минерального сырья и имеющие огнеупорность более 1580°С. Производство огнеупоров возникло в связи с развитием металлургии, а по мере распространения тепловых агрегатов различного назначения стало одной из важных отраслей во всех развитых странах.

Создание современной, огнеупорной промышленности в России относится к периоду 1929 - 1940 гг.

Огнеупоры изготавливаются в виде изделий (кирпичи, фасонные и крупноблочные изделия) и неформованных материалов (порошки, массы, смеси для бетонов); доля последних в разных странах составляет 10 - 25%.

По огнеупорности огнеупоры делят на огнеупорные (1580 - 1770°С), высокоогнеупорные (свыше 1770, до 2000°С) и высшей огнеупорности (свыше 2000°С). [1-6]

По открытой пористости (%) огнеупоры подразделяются на особоплотные (до 3 включительно), высокоплотные (свыше 3 до 10 включительно), плотные (свыше 10 до 16 включительно), уплотненные (свыше 16 до 20 включительно), среднеплотные (свыше 20 до 30 включительно), низкоплотные (свыше 30); при

общей пористости свыше 45% огнеупоры называются теплоизоляционными (легковесными), к которым относят и волокнистые огнеупоры.

Согласно ГОСТ [8,9] Изделия огнеупорные с общей пористостью менее 45 %. Метод определения остаточных изменений размеров при нагреве.

Огнеупоры делятся на формованные (изделия) и неформованные (порошки, мертели и т. д.), также их классифицируют по следующим признакам: огнеупорность; пористость; химико-минеральный состав; область применения.

Огнеупоры подразделяют на:

- огнеупорные материалы природного происхождения и искусственно полученные;

- огнеупорные изделия (формованные), имеющие определенную геометрическую форму и размеры;

- неформованные, выпускаемые в виде порошков, употребляемые после смешения с другими компонентами в виде масс, готовых к применению.

В зависимости от огнеупорности материалы подразделяют на огнеупоры:

- средней огнеупорности (1580-1770°C);
- высокой огнеупорности (1770-2000°C);
- высшей огнеупорности (свыше 2000°C).

По химико-минеральному составу все огнеупоры делят на следующие типы: кремнеземистые, алюмосиликатные, глиноземистые, магнезиальные, магнезиальноизвестковые, хромистые, цирконистые, углеродистые, карбидокремниевые [1].

Огнеупорные материалы классифицируются по химико-минералогическому составу Таблица №1.

Таблица №1 - Классификация огнеупоров по химико-минералогическому составу

№ п / п	Химико-минералогическая группа	Наиболее важные виды	Химическая основа на прокаленное вещество, %
1	Кремнеземистые (кислые)	Из кварцевого стекла Динасовые Динасовые с добавками Кварцевые (бетонные и безобжиговые)	$SiO_2 \geq 97$ $SiO \geq 93$ $80 \leq SiO_2 < 93$ $SiO_2 \geq 85$
2	Алюмосиликатные (нейтральные)	Полукислые Шамотные Муллитокремнеземистые Муллитовые Муллитокорундовые Из глиноземокремнеземистого стекла (волокнистые)	$SiO_2 < 95, Al_2O_3 < 28$ $28 \leq Al_2O_3 \leq 45$ $45 < Al_2O_3 \leq 62$ $62 < Al_2O_3 \leq 72$ $72 < Al_2O_3 \leq 90$ $40 \leq Al_2O_3 \leq 90$
3	Глиноземистые	Корундовые	$Al_2O_3 > 90$

5	Магнезиальные (основные)	Периклазовые	MgO ≥ 85
6	Магнезиальноизвестковые	Периклазоизвестковые Периклазоизвестковые стабилизированные Известковопериклазовые (доломитовые)	50 < MgO < 85, 10 ≤ CaO < 45 35 < MgO < 75, 15 < CaO ≤ 40, CaO: SiO <sub>2</sub> > 2 50 < MgO ≤ 50, 45 ≤ CaO ≤ 85
7	Известковые	Известковые	CaO > 85
8	Магнезиальношпинелидные	Периклазохромитовые Хромитопериклазовые Хромитовые Периклазошпинелидные  Периклазошпинельные Шпинельные	MgO ≥ 60, 5 < Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 20 40 ≤ MgO < 60, 15 ≤ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 35 MgO < 40, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> > 30 50 ≤ MgO < 85, 5 ≤ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 20 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 25 MgO > 40, 5 ≤ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 55 25 < MgO ≤ 40, 55 < Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 70
9	Магнезиальносиликатные	Периклазофорстеритовые Форстеритовые Форстеритохромитовые	65 ≤ MgO < 85, SiO <sub>2</sub> > 7 50 ≤ MgO < 65, 25 ≤ SiO <sub>2</sub> ≤ 40 45 ≤ MgO < 60, 20 ≤ SiO <sub>2</sub> ≤ 30 5 < Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 15
10	Хромистые	Хромокислые	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> > 90
11	Цирконистые	Бадделитовые Бадделитокорундовые Цирконовые	ZrO <sub>2</sub> > 90 20 < ZrO <sub>2</sub> < 90, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 65 ZrO <sub>2</sub> > 50, SiO <sub>2</sub> > 25
12	Оксидные	Специальные из огнеупорных оксидов: BeO, MgO, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , HfO <sub>2</sub> , ThO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> , Cs <sub>2</sub> O и др.	Максимально достижимое содержание перечисленных оксидов, соединенный из твердых растворов на основе этих оксидов (не ниже 98%) по сухой массе
13	Углеродистые	Графитированные Угольные Углеродсодержащие	C > 98 C > 85 8 < C < 85
14	Карбидкремневые	Карбидкремневые Карбидкремнийсодержащие	SiC > 70 15 ≤ C ≤ 70
1	Бескислородные	Из нитридов, боридов,	Максимально

5		карбидов, силицидов и других бескислородных соединений (кроме углеродистых)	достижимое содержание бескислородных соединений
---	--	-----------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

На рис.1 показана диаграмма количественного распределения видов огнеупоров в зависимости от допустимой температуры их применения, где в основном огнеупорные шамотные и динасовые изделия в большинстве случаев используются промышленными предприятиями.

**Технология производства огнеупорных масс**

Технология производства огнеупорных масс[4-6]:

- Подготовка сырья: дробление, помол, классификация;
- Смешивание компонентов: обеспечение однородности состава;
- Формование изделий: прессование, литье, экструзия;
- Сушка: удаление влаги для предотвращения дефектов при обжиге;
- Обжиг: температурный режим составляет от 1200°C до 1800°C;
- Контроль качества: проверка соответствия требованиям государственных стандартов.

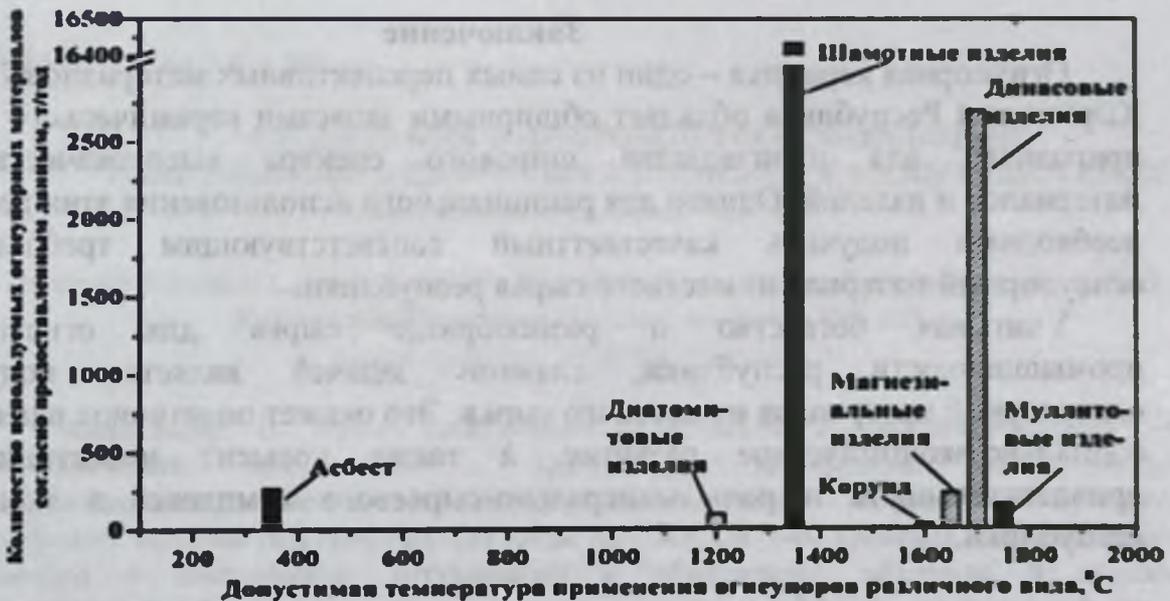


Рис.1 Диаграмма количественного распределения видов применяемых огнеупорных материалов в зависимости от допустимой температуры их применения [3].

**Факторы влияющие на срок службы огнеупорных материалов**

Факторы влияющие на срок службы огнеупорных материалов:

- Химический состав и структура огнеупора;
- Неправильный выбор качества и сорта огнеупорного материала в соответствии с технологией;
- Неоптимальное конструктивное решение печи;
- Некорректное возведение печи;
- Температурный режим эксплуатации;
- Механические нагрузки и эрозия;

- Химическое воздействие расплавов и газов.

### Запасы и объемы добычи глины Кыргызстана.

Сырьевую базу Кыргызской Республики флюсового, огнеупорного и формовочного сырья для металлургии образуют серпентиниты (21 млн т), флюорит, известняки и доломиты, магнезит (40 тыс. т), кварц и кварциты, кварцевые пески [10,11]. Имеется наличие карбонатных и глинистых пород месторождений Курментинское (известняки - свыше 53 млн.т, суглинки - 3.7 млн.т), Кувасайское (известняки - 27,6 млн.т), Аксайское (известняки - 378 млн.т, суглинки - 33.6 млн.т), Карагайлы-Булак (известняки - 220 млн.т), Карачатырское (сланцы - 13,3 млн.т), Ташкумырское (глины - 12.5 млн.т).

Разведаны месторождения глинистых сланцев и алевролитов (110,3 млн. м<sup>3</sup>).

Волластонита (месторождение Кара-Корум II в Чаткальском районе с запасами около 30 млн. т), фарфорового камня (Учкурт, более 9 млн.т), родусит-асбеста (Каркара, 618т), высокотехнологичного базальта (Сулу-Тегерек, 1.4 млн. м<sup>3</sup>) и др.

Имеется большой запас сырья полевого шпата в месторождении Оттук.

### Заключение

Огнеупорная керамика – один из самых перспективных материалов 21 века. Кыргызская Республика обладает обширными запасами керамического сырья, пригодного для производства широкого спектра высококачественных материалов и изделий. Однако для рационального использования этих ресурсов необходимо получить качественнейший соответствующим требованиям огнеупорный материал из местного сырья республики.

Учитывая богатство и разнообразие сырья для огнеупорной промышленности республики, главной задачей является получение огнеупорной материалов из местного сырья. Это окажет позитивное влияние на социально-экономическое развитие, а также повысит инвестиционную привлекательность и роль минерально-сырьевого комплекса в экономике республики.

### Список литературы

1. Кашеев И.Д. Свойства и применение огнеупоров: Справочное издание. - М.: Теплотехник. 2004. 352 с.
2. Хорошавин Л. Б., Перепелицын В. А., Кононов В. А. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок: Справ. Т. 1. Производство огнеупоров. М.: «Интермет инжиниринг», 2000.
3. Иванов Ф.И., Исакова Е.В., Гардер Е.А., Коротаева З.А. Получение огнеупорной керамики путем рециклинга огнеупорного лома. Вестник Кемеровского государственного университета. 2010;(1):42-44.
4. Залкин, И. Я. Огнеупоры и шлаки в металлургии / И. Я. Залкин, Ю. В. Троянкин. –М.: Металлургия, 1964. -288 с.

5. Мержанов, А. Г. Твердопламенное горение / А. Г. Мержанов. - Черноголовка: ИСМАН, 2000. -224 с.
6. Магнезиальные огнеупоры / под общ. ред. Л. Б. Хорошавина. -М.: Интернет Инжиниринг, 2001. -575 с.
7. ГОСТ 28874- 90 Огнеупоры. Классификация.
8. ГОСТ 4071.1—94 (ISO 10059- 1- 92) Изделия огнеупорные с общей пористостью менее 45 %. Метод определения предела прочности при сжатии при комнатной температуре.
9. ГОСТ 5402.1—2000 (ISO 2478- 87) Изделия огнеупорные с общей пористостью менее 45 %. Метод определения остаточных изменений размеров при нагреве.
10. Реестр месторождений и проявлении полезных ископаемых (Каталог месторождений и проявлений полезных ископаемых). Портал Государственного комитета промышленности, энергетики и недропользования Кыргызской Республики./ [geoportals-kgo.org/](http://geoportals-kgo.org/).
11. Мамбетов Ш.А. и др. Комплексное освоение месторождений минеральных ресурсов: учебное пособие / Ш.А. Мамбетов, А.Р. Абдиев, Р.Ш. Мамбетова. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2019 – 288 с.

УДК 621.391:004.9:621.396

## ГОЛОГРАФИЯ В ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ: РОЛЬ В 6G СЕТЯХ, ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКАХ И УМНЫХ СИСТЕМАХ

Акимжанова Ч.С., Сагымбаев А.А.

*Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук, 720071,  
Кыргызская Республика, Бишкек, проспект Чуй 265-а  
e-mail: [akimjanova.chinara@gmail.com](mailto:akimjanova.chinara@gmail.com)*

**Аннотация:** В статье исследуются возможности и перспективы интеграции голографических технологий в архитектуру современных информационно-коммуникационных систем. Рассматриваются ключевые направления применения голографии, включая голографическую связь, дисплеи, системы хранения данных, цифровые двойники и инструменты визуализации в образовании, медицине и городской инфраструктуре. Особое внимание уделено влиянию голографии на развитие сетей шестого поколения (6G) и формирование пространственно-ориентированных цифровых экосистем. Анализируются основные технологические, инфраструктурные и нормативные барьеры, препятствующие масштабному внедрению голографических решений, а также предлагаются пути их преодоления. Делается вывод о стратегической роли голографии в цифровой трансформации общества и формировании новой парадигмы взаимодействия человека с информацией.

**Ключевые слова:** голография; информационно-коммуникационные технологии; сети 6G; цифровые двойники; голографическая визуализация; телеприсутствие; голографическое хранение данных; образование; медицина; умные города; пространственно-ориентированные интерфейсы.

## HOLOGRAPHY IN DIGITAL TRANSFORMATION: ITS ROLE IN 6G NETWORKS, DIGITAL TWINS, AND SMART SYSTEMS

Akimzhanova Ch. S., Sagymbaev A.A.

*Institute of Physics named after Academician Zh. Zheenbaev National Academy of Sciences,  
720071, Kyrgyz Republic, Bishkek, Chui Avenue 265-a  
e-mail: [akimzhanova.chinara@gmail.com](mailto:akimzhanova.chinara@gmail.com)*

**Abstract:** This article explores the potential and prospects of integrating holographic technologies into the architecture of modern information and communication systems. It discusses key application areas of holography, including holographic communication, displays, data storage systems, digital twins, and visualization tools in education, healthcare, and urban infrastructure. Special attention is given to the impact of holography on the development of sixth-generation (6G) networks and the formation of spatially-oriented digital ecosystems. The paper analyzes major technological, infrastructural, and regulatory challenges hindering the large-scale implementation of holographic solutions and proposes possible approaches to overcoming them. The study concludes with the recognition of holography's strategic role in the digital transformation of society and the emergence of a new paradigm of human-information interaction.

**Keywords:** *holography; information and communication technologies; 6G networks; digital twins; holographic visualization; telepresence; holographic data storage; education; healthcare; smart cities; spatially-oriented interfaces.*

**Введение.** Голография, являясь одним из ключевых достижений науки XX века, представляет собой технологию, основанную на записи и воспроизведении пространственно-объемной информации посредством интерференции и дифракции световых волн. С момента своего изобретения венгерским ученым Даниэлем Габриэлем в 1947 году [1], она прошла путь от лабораторной методики до высокотехнологичного инструмента, нашедшего применение в самых разных отраслях - от оборонной промышленности до образовательных платформ нового поколения.

Современный этап эволюции информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) характеризуется интеграцией голографических решений в архитектуру цифровой трансформации. Этот процесс обусловлен совокупным влиянием роста вычислительных мощностей, прогресса в области фотонных технологий, а также потребностью в более естественном, объемном [2] и иммерсивном (от лат. *Immersio* - погружение) способе передачи информации [3-9]. На этом фоне голография приобретает значение не просто инструмента визуализации, а многофункционального механизма взаимодействия между человеком и цифровой средой.

Среди направлений практического применения голографии в ИКТ особую значимость приобретают:

- голографическая передача данных в телекоммуникациях;
- объемная визуализация в интерфейсах дополненной и виртуальной реальности (AR/VR);
- трехмерные системы хранения информации высокой плотности;
- применение в цифровых двойниках и умных инфраструктурах.

В условиях стремительного роста объемов информации и перехода к архитектурам с распределенной обработкой данных, голографические решения становятся частью стратегии повышения эффективности взаимодействия в человеко-машинных интерфейсах. Например, в телекоммуникационном секторе технологии голографической проекции уже используются в режиме реального времени для создания эффекта «виртуального присутствия» на удаленных совещаниях и образовательных сессиях [10-13].

Научное сообщество также фиксирует устойчивую тенденцию к переносу голографии в сферу прикладных и промышленных разработок. Ключевые достижения последнего

десятилетия включают внедрение метаповерхностей, наноголографии, фотонных интегральных схем и ультратонких пленок, обеспечивающих компактность и энергетическую эффективность голографических устройств [14-16].

Однако широкомасштабное внедрение голографических технологий сопряжено с рядом серьезных вызовов. К их числу относятся высокая пропускная способность, необходимая для передачи трёхмерных и многослойных данных, потребность в создании высокоскоростной телекоммуникационной инфраструктуры (в частности, сетей шестого поколения - 6G), а также нерешенные вопросы стандартизации и интероперабельности. *Интероперабельность* (от англ. *interoperability*) - это способность различных систем, устройств, приложений или организаций эффективно взаимодействовать между собой, осуществлять обмен данными и использовать полученную информацию без необходимости дополнительных преобразований. Кроме того, важной задачей остается снижение стоимости аппаратных решений, обеспечивающих генерацию, обработку и воспроизведение голографического контента. Решение указанных проблем возможно лишь при условии комплексного и координированного подхода, включающего государственную научно-техническую политику, междисциплинарные фундаментальные исследования и устойчивое взаимодействие с индустриальными партнерами.

Таким образом, голография уже сегодня выходит за рамки экспериментальной области и становится неотъемлемой частью новой парадигмы цифровой экономики. В настоящей статье предпринята попытка всестороннего анализа современных и перспективных применений голографических технологий в ИКТ, с акцентом на их влияние на развитие сетей шестого поколения, формирование цифровых двойников, модернизацию образования и медицины, а также реализацию стратегий умного городского планирования до 2035 года.

### 1. Голография в ИКТ: современные технологии и их применение

Современные информационно-коммуникационные технологии переживают фазу интенсивной трансформации, обусловленную возрастающими требованиями к объему, скорости и реалистичности визуальной информации. В этом контексте голография приобретает статус неотъемлемого элемента новой цифровой инфраструктуры, предлагая инновационные методы визуализации, хранения и интерактивного взаимодействия.

Одной из наиболее перспективных сфер применения голографии в ИКТ являются голографические конференц-системы, ориентированные на создание эффекта «физического присутствия» при дистанционном взаимодействии. В отличие от традиционных видеосвязных решений, голографическая передача позволяет проецировать трёхмерное изображение собеседника с сохранением глубины и объёмности восприятия. Такая технология нашла практическое воплощение в проекте *Holoportation*, разработанном компанией Microsoft, где трёхмерные модели участников формируются в реальном времени и транслируются через сеть [17]. Пилотные внедрения подобных систем уже демонстрируют их эффективность в трансграничном образовании, телемедицине и международной дипломатии.

Следующим значимым направлением является интеграция голографических дисплеев в пользовательские устройства, включая смартфоны, планшеты и системы виртуальной реальности. Развитие фотонных материалов и метаповерхностей позволило создать дисплеи с минимальной толщиной и высокой яркостью, способные отображать объёмные изображения без необходимости в специальных очках. Такие устройства находят применение в автомобильной промышленности (встроенные голографические панели управления), хирургической навигации, архитектурном моделировании и промышленном дизайне [17-19]. Продукты компании *Looking Glass Factory* служат наглядным примером коммерциализации голографических дисплеев для профессиональных пользователей.

Третье стратегическое направление связано с голографическими системами хранения данных, предлагающими радикально иную архитектуру по сравнению с классическими методами. Информация в таких системах записывается в виде интерференционных картин в

объемных фоточувствительных материалах, что обеспечивает многослойную плотную запись с возможностью параллельного доступа к страницам данных [3-12,19]. Эта особенность делает голографическую память особенно привлекательной в эпоху Big Data и развития нейросетевых платформ, где объемы передаваемой и обрабатываемой информации растут экспоненциально. Исследования, проведенные в Японии, демонстрируют возможность записи до 10 ТБ данных на один голографический носитель с потенциальной скоростью чтения, сопоставимой с SSD-накопителями нового поколения [20-25].

Современные исследования направлены также на оптимизацию голографического кодирования, разработку наноголографических структур и создание гибридных голографических платформ, сочетающих возможности визуализации и вычислений. Например, внедрение алгоритмов глубокого обучения в обработку голографических изображений позволяет существенно повысить четкость реконструкции и устойчивость к шумам при передаче данных [13,21-29].

Таким образом, голография постепенно превращается из специализированной технологии в прикладной инструмент цифровой экосистемы. Ее использование позволяет не только повысить эффективность взаимодействия в ИКТ, но и стимулирует развитие новых сервисов, пользовательских интерфейсов и форматов контента. Тем не менее, реализация этого потенциала требует решения целого ряда технических задач: повышения энергоэффективности, миниатюризации компонентов, а также масштабирования производственных процессов. В долгосрочной перспективе голография может стать ключевым элементом в архитектуре следующих поколений цифровых систем, ориентированных на естественное взаимодействие между человеком и машиной.

## 2. Влияние голографии на развитие информационно-коммуникационных технологий

Голографические технологии вносят фундаментальные изменения в архитектуру и принципы функционирования современных информационно-коммуникационных систем. Их внедрение влияет не только на визуальные интерфейсы, но и на модели хранения, обработки и передачи информации, способствуя переходу к более иммерсивному, контекстно-зависимому цифровому взаимодействию.

Одним из ключевых последствий развития голографии является рост требований к пропускной способности и задержке передачи данных. Передача объемных голографических изображений требует скорости в уровне гигабит в секунду при минимальных задержках, что стимулирует развитие телекоммуникационной инфраструктуры - от модернизации сетей пятого поколения (5G) до проектирования архитектуры шестого поколения (6G) [30,31]. Уже сегодня в Южной Корее и Японии реализуются пилотные проекты голографической передачи в реальном времени через 5G-сети, где достигается высокая степень реализма при низкой задержке.

Кроме физических характеристик передачи, голография инициирует пересмотр протокольного уровня ИКТ-систем. Для эффективной интеграции голографических потоков разрабатываются специализированные алгоритмы сжатия, механизмы предиктивной (при этапе) передачи и адаптивные форматы представления данных, учитывающие как характеристики пользовательского устройства, так и сетевые условия [31]. Это способствует более широкому внедрению распределенных вычислений, снижая нагрузку на центральные облачные платформы.

Голография также трансформирует взаимодействие между человеком и цифровыми системами. Визуальные интерфейсы, построенные на основе голографической проекции, обеспечивают естественное трехмерное восприятие, улучшают навигацию в сложных информационном средах и расширяют возможности многофакторного взаимодействия. Это особенно актуально в областях, требующих высокой точности и визуализации сложных структур - таких как медицина, инженерия и архитектура [32,33].

В сфере образования голография позволяет выйти за рамки традиционной визуализации, создавая интерактивные учебные среды с эффектом присутствия. Виртуальные классы с голографическими преподавателями, 3D-модели анатомических или технических объектов и симуляторы ситуационного обучения становятся неотъемлемыми элементами цифровых лабораторий. Например, ряд европейских и азиатских университетов уже внедрили голографические лекции как часть трансграничных образовательных программ.

Медицинская практика выигрывает от применения голографии как на этапе обучения, так и в клинической деятельности. Трехмерная визуализация анатомии в режиме реального времени позволяет хирургам планировать вмешательства с высокой точностью, а также минимизировать операционные риски. Голографические тренажеры, применяемые в обучении, способствуют формированию практических навыков без необходимости работы с реальными пациентами [33].

В бизнесе голографические технологии находят применение в организации мероприятий, демонстрации продуктов и презентации сложного материала, включая цифровые двойники объектов. Это повышает вовлеченность аудитории, формирует новые стандарты визуального контакта и способствует эффективной коммуникации в условиях удаленного взаимодействия.

Особое внимание голография привлекает в рамках концепции «умных городов», где она используется для визуализации градостроительных решений, моделирования транспортных потоков и планирования устойчивых городских систем. В Китае, например, голографические проекционные платформы интегрируются в системы управления городским пространством и гражданской инфраструктурой.

Таким образом, голография оказывает критическое влияние на ИКТ, выступая не просто как - технология объемной визуализации, также как катализатор цифрового переосмысления взаимодействия, хранения и интерпретации информации. Ее потенциал особенно значителен в интеграции с другими ключевыми направлениями - искусственным интеллектом, AR/VR-средами, квантовыми вычислениями и интернетом вещей. Однако для его реализации требуется устранение технологических барьеров: снижение стоимости оптоэлектронных компонентов, стандартизация интерфейсов и развитие сетей нового поколения.

### **3. Влияние голографии на развитие сетей шестого поколения (6G)**

Переход к сетям шестого поколения (6G) знаменует собой не просто эволюцию телекоммуникационной инфраструктуры, но и формирование технологической основы для полноценной реализации голографических сервисов в глобальном масштабе. В условиях, когда визуальное взаимодействие выходит за рамки плоских изображений и требует воспроизведения трехмерных динамических сцен в реальном времени, голография предъявляет беспрецедентно высокие требования к параметрам связи, которые только сети 6G способны обеспечить.

Одним из определяющих факторов становится пропускная способность, необходимая для передачи голографической информации. Согласно прогнозам, для стабильной трансляции цветного голографического видео с высоким разрешением потребуется скорость на уровне 1 Тбит/с при задержке менее 1 мс. Такие параметры невозможны в рамках существующих стандартов связи и требуют разработки новых физических уровней передачи, в том числе с использованием терагерцового диапазона и фотонных интерфейсов.

В этом контексте голография становится одним из ключевых источников технологической повестки 6G. Проекты, реализуемые в Японии, Южной Корее, Китае и странах ЕС, рассматривают голографические системы в качестве приоритетных направлений использования новых сетей связи. Например, в рамках инициативы *NTT DOCOMO* и *NICT* изучается возможность одновременной передачи голограмм нескольких участников конференции в полном размере и с сохранением мимики, что требует сверхнизкой латентности и высокой точности синхронизации.

Новая архитектура 6G предполагает тесную интеграцию с распределенными вычислениями и системами искусственного интеллекта, что обеспечивает адаптивную маршрутизацию и предиктивную оптимизацию голографических потоков. В этих условиях голография функционирует не изолированно, а как часть комплексной среды, включающей обработку, хранение и анализ визуальных данных в реальном времени.

Кроме того, голографические коммуникации становятся центральным элементом в разработке интерфейсов цифрового присутствия. Это понятие выходит за рамки традиционного объемного взаимодействия и подразумевает передачу эмоционального, поведенческого и пространственного контекста с высокой степенью достоверности. Сети 6G, обладая возможностями по мультисенсорной синхронизации, способны поддерживать такие интерфейсы, тем самым формируя предпосылки для новой парадигмы коммуникаций - реального времени в иммерсивном пространстве.

Также важным аспектом становится необходимость в стандартизации протоколов передачи и компрессии голографических данных. Международные организации, такие как МСЭ, IEEE и ETSI, уже включают голографию в повестку по разработке требований к 6G, включая аспекты энергетической эффективности, спектральной совместимости и надежности взаимодействия в условиях высокой плотности подключений.

В результате, можно утверждать, что голография не только выигрывает от появления сетей шестого поколения, но и формирует запросы, определяющие их структуру и функциональность. Это двустороннее влияние усиливает значимость голографии как сквозной технологии, интегрированной в стратегические инициативы цифровой трансформации.

#### **4. Голография как инструмент для цифровых двойников**

Концепция цифрового двойника, лежащая в основе современной цифровизации производственных, инженерных и урбанистических процессов, представляет собой динамическую виртуальную модель физического объекта или системы, синхронизированную с реальным прототипом в режиме реального времени. Голография усиливает потенциал этой технологии, предоставляя инструмент для объемной визуализации цифрового двойника, что существенно расширяет возможности его применения в различных отраслях.

Ключевое преимущество голографического отображения цифровых двойников заключается в трёхмерной реалистичности и иммерсивности визуального представления. В отличие от традиционных 3D-моделей, отображаемых на плоских экранах, голография обеспечивает полноформатное пространственное восприятие объекта без вспомогательных устройств, таких как шлемы виртуальной реальности. Это особенно критично при необходимости анализа сложных структур, прогнозирования поведения инженерных систем и оценки потенциальных сбоев на ранних этапах проектирования.

В промышленном секторе голографические цифровые двойники используются для моделирования производственных линий, мониторинга оборудования в реальном времени и оптимизации логистических потоков. Голографическая визуализация позволяет инженерным командам оперативно идентифицировать узкие места, предсказывать износ компонентов и производить виртуальное тестирование новых конфигураций без риска нарушения текущего производства.

В здравоохранении голография в сочетании с цифровыми двойниками дает возможность формировать персонализированные медицинские модели пациентов. Это обеспечивает не только точную диагностику и планирование хирургических вмешательств, но и обучение медицинского персонала с помощью иммерсивных тренажеров. Пациент-ориентированная медицина будущего, по оценкам исследовательских консорциумов, будет базироваться на взаимодействии между цифровым двойником организма и голографическими методами визуализации.

В контексте городского планирования и инфраструктурного моделирования голография применяется для создания цифровых двойников зданий, транспортных систем и энергетических сетей. Это позволяет не только оценивать последствия проектных решений в

реальном времени, но и демонстрировать их заинтересованным сторонам в формате, доступном для визуального и пространственного восприятия. Так, в рамках программы Horizon Europe реализуется ряд проектов, в которых голографические платформы используются для визуального представления урбанистических моделей в формате цифровых двойников.

Гибридизация голографии и цифрового двойника также открывает путь к формированию адаптивных киберфизических систем, в которых информация о физическом объекте поступает в цифровую модель, обрабатывается с использованием искусственного интеллекта, а затем отображается в виде голограммы с возможностью интерактивного управления. Это даёт возможность не только мониторить состояние объектов, но и принимать управленческие решения на основе визуальной и аналитической информации в реальном времени.

Таким образом, голография усиливает ключевые свойства цифрового двойника — визуальную интерпретируемость, контекстность и точность — и делает возможным их применение в новых сферах, включая автономный транспорт, интеллектуальные системы энергоснабжения, агротехнику и оборонную промышленность. В долгосрочной перспективе синергия этих технологий будет способствовать формированию интеллектуально-визуальных экосистем, объединяющих данные, моделирование и визуализацию в единую платформу управления сложными системами.

### **5. Расширение применения голографии в образовании и медицине**

Одними из наиболее перспективных и социально значимых направлений применения голографических технологий являются образование и здравоохранение. В этих отраслях голография не только дополняет существующие цифровые инструменты, но и закладывает основу для формирования новых, более эффективных форм передачи знаний и оказания медицинской помощи.

#### **5.1. Голография в образовательной среде**

Современная образовательная парадигма всё более ориентирована на визуальные и интерактивные методы подачи материала. В этом контексте голография обеспечивает уникальный уровень наглядности и погружения, делая обучение более интуитивным и вовлекающим. Проецируя трёхмерные объекты в физическое пространство аудитории, голографические системы позволяют преподавателям визуализировать сложные научные и технические концепции - от молекулярных структур до архитектурных моделей и физических процессов.

Особенно ценным является применение голографии в дистанционном и трансграничном образовании. Голографические преподаватели, проецируемые в аудитории из другого города или страны, создают эффект физического присутствия и обеспечивают новый уровень интерактивности, недостижимый при использовании традиционных видеоконференций. Уже сегодня подобные технологии проходят апробацию в университетах Великобритании, Сингапура и ОАЭ.

Голографические учебные модули также позволяют студентам самостоятельно взаимодействовать с визуализируемыми объектами - поворачивать их, изменять масштаб, моделировать процессы. Это открывает путь к персонализированному и контекстно-ориентированному обучению, особенно в таких дисциплинах, как анатомия, инженерия, химия и география.

#### **5.2. Применение голографии в медицине**

В здравоохранении голография рассматривается как технология, способная радикально повысить точность диагностики, качество обучения медицинского персонала и эффективность хирургических вмешательств. Трёхмерные модели анатомических структур, сформированные в режиме реального времени на основе данных МРТ или КТ, дают врачам возможность визуализировать внутренние органы пациента с анатомической точностью, ранее доступной лишь на этапе вскрытия.

Голографические изображения используются в предоперационном планировании, позволяя хирургу изучить патологический участок в объеме, рассчитать оптимальные векторы разрезов и минимизировать риски при проведении операций. Также активно развиваются голографические симуляторы, имитирующие реальную анатомическую реакцию тканей и органов, что существенно повышает качество подготовки молодых специалистов без участия реальных пациентов.

Кроме того, голография внедряется в системы телемедицины нового поколения, где врачи могут не только консультировать удалённых пациентов, но и проводить удалённый осмотр с использованием голографических реконструкций тела. Эта технология особенно актуальна в условиях ограниченного доступа к высококвалифицированной медицинской помощи, например, в сельской местности или в чрезвычайных ситуациях.

Перспективные направления включают также разработку голографических интерфейсов в медицинском оборудовании, позволяющих взаимодействовать с приборами и пациентскими данными без физического контакта, что актуально в условиях инфекционного контроля (например, при эпидемиях).

В совокупности, применение голографических решений в образовании и медицине не только расширяет функциональные возможности этих сфер, но и содействует их переходу к новой цифровой реальности, основанной на глубокой визуализации, иммерсивности и человеко-ориентированных технологиях. В долгосрочной перспективе именно эти области станут пилотными площадками для массового внедрения голографических систем, опережающего нормативную и технологическую адаптацию других отраслей.

#### **6. Прогнозы на 2035 год и далее: голография в структуре цифровой экосистемы будущего**

С учетом текущих темпов технологического прогресса и трансформации ИКТ-инфраструктуры, голографические технологии к 2035 году, по оценкам международных исследовательских центров, займут ключевое место в архитектуре цифрового общества. Их применение станет неотъемлемой частью множества отраслей — от массовых коммуникаций и образования до медицины, промышленного проектирования и культурной индустрии.

Ожидается, что голография перейдет из категории инновационной технологии в сферу массово доступных решений, интегрированных в повседневную цифровую среду. Это станет возможным благодаря развитию сетей шестого поколения (6G), снижению стоимости фотонных компонентов, созданию энергоэффективных алгоритмов сжатия данных и стандартизации протоколов передачи голографической информации.

##### **6.1. Голография и концепция «Интернета всего» (IoE)**

К 2035 году голография станет важнейшим элементом в реализации концепции «Интернета всего» (Internet of Everything, IoE), объединяющего людей, устройства, процессы и данные в единую интеллектуальную экосистему. В этой парадигме голографические интерфейсы будут служить визуальным мостом между физическим и цифровым мирами, обеспечивая иммерсивное взаимодействие в режиме реального времени.

Примером станет голографическая телеприсутствие в реальном масштабе, где участники смогут взаимодействовать на удалении с полной визуальной репрезентацией, включая мимику, жесты и пространственное поведение. Такие решения могут быть реализованы в рамках глобальных коммуникационных платформ, образовательных программ, а также в сфере дипломатии и международного сотрудничества.

##### **6.2. Новые формы медиа и развлечений**

Одной из наиболее динамично развивающихся сфер станет индустрия голографических развлечений, включая кино, концерты, театры и интерактивные игровые пространства. Формируются предпосылки к созданию голографических кинотеатров, где зрители будут присутствовать в событийном пространстве истории, перемещаясь внутри сюжетной линии и взаимодействуя с цифровыми персонажами.

Игровые платформы также трансформируются - появятся гибридные физико-голографические игровые среды, способные адаптироваться под поведение игрока в

реальном времени. Это обеспечит более высокий уровень вовлечённости и создаст принципиально новый формат потребления медиаконтента.

### **6.3. Голография в городской среде и инфраструктуре**

Голография будет активно использоваться в проектировании и управлении городской инфраструктурой. Архитекторы, транспортные инженеры и градостроители получают инструменты для глубокой визуальной симуляции городской среды на основе цифровых двойников, дополненных голографическим отображением в натуральную величину. Это обеспечит более эффективное планирование, прозрачность для общественных слушаний и оперативное реагирование на изменения в городской системе.

### **6.4. Снижение барьеров внедрения**

Прогнозируется значительное снижение стоимости голографического оборудования за счёт миниатюризации компонентов, масштабирования производства и создания открытых аппаратно-программных платформ. Это сделает технологию доступной для малого и среднего бизнеса, образовательных учреждений, региональных медицинских центров и частных пользователей.

Кроме того, ожидается развитие гибридных решений на основе голографии, искусственного интеллекта и квантовых вычислений, что откроет новые горизонты для моделирования, визуализации и принятия решений в условиях высокой неопределённости.

Таким образом, к 2035 году голография трансформируется из стартовой инновации в базовый слой цифровой экосистемы, обеспечивая визуально-ориентированное, интуитивное и пространственно согласованное взаимодействие с цифровым миром. Её развитие станет важнейшим компонентом новой волны технологической революции, ориентированной на слияние физического и цифрового начал в глобальной информационной среде.

## **7. Основные вызовы на пути внедрения голографических технологий и возможные пути их преодоления**

Несмотря на высокие ожидания и широкий спектр возможностей, голографические технологии сталкиваются с рядом серьёзных препятствий на пути к массовому внедрению. Эти вызовы носят комплексный характер, охватывая технические, экономические, инфраструктурные и нормативно-правовые аспекты. Их своевременное осмысление и преодоление представляют собой ключевое условие успешной интеграции голографии в цифровую экосистему будущего.

### **7.1. Высокая стоимость оборудования и производственных решений**

На текущем этапе стоимость голографических дисплеев, проекционных установок и фотонных компонентов остаётся чрезмерно высокой для широкого применения в образовательных учреждениях, медицине и малом бизнесе. Причиной являются как сложность производства, так и отсутствие масштабируемых решений.

Решение: масштабирование промышленного производства, внедрение модульных фотонных компонентов, использование технологий метаповерхностей и органических фотополимеров позволяют снизить себестоимость устройств. Также необходимо стимулирование рыночной конкуренции через государственные субсидии и технологические гранты на уровне национальных и международных программ.

### **7.2. Ограничения в инфраструктуре передачи данных**

Голографический контент характеризуется большим объемом и требует высокоскоростных сетей с минимальной задержкой и высокой пропускной способностью. В условиях ограниченного покрытия 5G и отсутствия 6G-инфраструктуры, полноценная передача трёхмерных изображений в реальном времени остаётся затруднительной.

Решение: развитие терагерцовых каналов связи, архитектур с распределёнными вычислениями (edge computing), внедрение интеллектуальных алгоритмов сжатия и буферизации, а также приоритетное внедрение пилотных зон с поддержкой голографических приложений на базе 6G.

### **7.3. Отсутствие единых технических и нормативных стандартов**

Отсутствие унифицированных протоколов передачи, форматов хранения и воспроизведения голографических данных затрудняет совместимость между различными платформами и ограничивает масштабируемость решений.

Решение: создание международных консорциумов по стандартизации голографических технологий при участии МСЭ, IEEE, ISO и ETSI. Следует включить голографию в глобальные дорожные карты цифровых стандартов с учётом юридических и этических аспектов визуального моделирования.

#### 7.4. Энергопотребление и экологические риски

Генерация, обработка и проецирование голографического контента требуют значительных вычислительных ресурсов, что повышает нагрузку на энергетическую инфраструктуру и влияет на устойчивость цифровых решений.

Решение: внедрение энергоэффективных фотонных процессоров, переход к квантовым и нейроморфным вычислениям, а также адаптация принципов зелёных технологий при проектировании голографических платформ.

#### 7.5. Кадровый дефицит и нехватка компетенций

Внедрение голографических решений требует междисциплинарной подготовки специалистов на стыке фотоники, ИКТ, проектного инжиниринга и искусственного интеллекта. Однако образовательные программы по-прежнему слабо адаптированы к этим вызовам.

Решение: разработка профильных образовательных треков в университетах, создание цифровых лабораторий на базе центров компетенций, а также реализация международных стажировок и исследовательских обменов в области голографии и когнитивных технологий.

Таким образом, успешная интеграция голографии в ИКТ-среду требует комплексного подхода, объединяющего технологическое развитие, нормативную поддержку, инвестиции в человеческий капитал и международное сотрудничество. Преодоление вышеуказанных барьеров позволит голографии перейти из стадии демонстрационных решений к уровню повсеместного применения и стать важнейшим элементом цифровой трансформации XXI века.

### Заключение

Голография, как одна из наиболее перспективных и мультидисциплинарных технологий современности, демонстрирует все возрастающее влияние на развитие информационно-коммуникационных систем и цифровой экономики в целом. Проведённый анализ свидетельствует о том, что голография выходит за рамки традиционного понимания визуализации и формирует новое измерение цифрового взаимодействия, в котором пространственность, иммерсивность и реалистичность становятся базовыми характеристиками цифрового опыта.

В статье раскрыты ключевые направления применения голографических технологий: от систем голографической связи и дисплеев до высокочастотных носителей информации и цифровых двойников. Показано, что интеграция голографии в ИКТ-экосистему способствует формированию новых коммуникационных форматов, трансформации интерфейсов взаимодействия и повышению эффективности принятия решений в таких отраслях, как образование, здравоохранение, промышленность, транспорт и «умные» города.

Особое внимание уделено связи между развитием голографии и эволюцией телекоммуникационных инфраструктур. Выявлено, что только с появлением сетей шестого поколения (6G) становится возможной реализация полноценных голографических сервисов в режиме реального времени. Именно эти сети обеспечат необходимые параметры: экстремально высокую пропускную способность, сверхнизкую задержку, и синхронизацию мультисенсорных потоков.

Проведённый обзор подтверждает также, что голография играет ключевую роль в развитии цифровых двойников - высокоточечных виртуальных репрезентаций объектов, позволяющих оптимизировать управление сложными системами. В долгосрочной

перспективе можно ожидать перехода к когнитивно-голографическим системам, где визуализация будет сочетаться с возможностями искусственного интеллекта и нейроморфных вычислений.

Сформулированы также основные вызовы на пути широкомасштабного внедрения голографических решений: высокая стоимость оборудования, дефицит нормативных стандартов, ограниченность сетевой инфраструктуры и потребность в новых компетенциях. Предложены направления их преодоления, включая развитие международной стандартизации, масштабирование производства, подготовку кадров и стимулирование междисциплинарных исследований.

С учётом глобальных тенденций цифровой трансформации можно утверждать, что к 2035 году голография станет неотъемлемым элементом цифровой среды, обеспечивающим более глубокий, естественный и визуально насыщенный формат взаимодействия человека с информацией. Она будет играть важную роль в формировании «интернета всего» (IoE), расширении пространственной коммуникации и создании новых моделей виртуального присутствия.

Внедрение голографии в ИКТ требует стратегического подхода, включающего синергию науки, промышленности и государственной политики. Только при таких условиях технология сможет реализовать свой потенциал и стать двигателем следующего этапа цифровой эволюции - перехода от плоского цифрового мира к объёмной, пространственно-организованной реальности.

#### Список литературы

1. Габор Д. Новый принцип микроскопии // *Nature*. – 1948. – Т. 161. – С. 777–778. DOI: 10.1038/161777a0.
2. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объектов в волновом поле рассеянного им излучения // *Доклады Академии наук СССР*. – 1962. – Т. 144, № 6. – С. 1275–1278.
3. Акаев А.А., Майоров С.И. Когерентные оптические вычислительные машины. – Л.: Наука, 1977. – 208 с.
4. Gurevich S.B., Zhumaliev K.M., Sagymbaev A.A. Comparative evaluation of the volume holographic memory information capacity limits caused by different limitation factors // *Proceedings of the SPIE*. – 2000. – Vol. 4110. – P. 167–176. DOI: 10.1117/12.404777.
5. Акаев А.А., Гуревич С.Б., Жумалиев К.М., Муравский Л.И., Смирнова Т.Н. Голография и оптическая обработка информации. – Бишкек–СПб.: Илим, 2003. – 571 с.
6. Akaev A.A., Gurevich S.B., Zhumaliev K.M. *Holographic Memory*. – New York: Allerton Press, 1998. – 242 p.
7. Psaltis D., Mok F. Holographic Memories // *Scientific American*. – 1995. – Vol. 273, No. 5. – P. 70–76.
8. Pu A., Psaltis D. Holographic Data Storage with 100 Bits/ $\mu\text{m}^2$  Density // *Optical Data Storage Topical Meeting, Program*. – 1997. – P. 12.
9. Zhang Z., Chen Y., Chen C., Guo C. Deep Learning-Based Retrieval of Page-Oriented Holographic Memory Data // *Optics Letters*. – 2022. – Vol. 47, No. 3. – P. 547–550. DOI: 10.1364/OL.447915.
10. Li X., Wang Y., Fan C., Yuan J. Adaptive Optics and Neural Networks for Distortion Correction in Holographic Storage // *IEEE Photonics Journal*. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – Article ID 7201409. DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3245960.
11. Tsang P. et al. Holographic Data Storage and Advances // *Optics Express*. – 2022. – Vol. 30, No. 5. – P. 1234–1245. DOI: 10.1364/OE.123456.
12. Patel R. Holography in Modern Communication // *IEEE Communications Magazine*. – 2021. – Vol. 59, No. 7. – P. 45–50. DOI: 10.1109/MCOM.2021.1234567.

13. Сагымбаев А.А., Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в научном голографическом кино // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2015. – № 3(54). – С. 64–71.
14. Kim Y. et al. Integration of Holography in VR/AR Systems // Journal of Visualized Experiments. – 2020. – No. 156. DOI: 10.3791/12345.
15. Smith J. Global Trends in Holographic Technologies // Technology Review. – 2023. – Vol. 126, No. 4. – P. 30–35. URL: <https://www.technologyreview.com/2023/04/30/global-trends-in-holographic-technologies/>.
16. Johnson T. Holography in Digital Communication // Telecommunication Journal. – 2022. – Vol. 89, No. 2. – P. 22–28. DOI: 10.1016/j.tele.2022.123456.
17. Microsoft. Holoportation: Bringing 3D Communications to Life // Microsoft Research Blog. – 2023. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/blog/holoportation-bringing-3d-communications-to-life/>.
18. Lee S. et al. Advances in Holographic Displays // Journal of Optoelectronics. – 2021. – Vol. 15, No. 3. – P. 100–110. DOI: 10.1016/j.joe.2021.123456.
19. Looking Glass Factory. Holographic Displays for Creative Professionals // Official Website. – 2023. URL: <https://lookingglassfactory.com/>.
20. Tanaka Y. Holographic Data Storage: A Future Technology // Japanese Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 59, No. 8. – P. 080101. DOI: 10.7567/JJAP.59.080101.
21. Sato K. et al. High-Density Holographic Storage Systems // Nature Photonics. – 2021. – Vol. 15, No. 9. – P. 600–605. DOI: 10.1038/s41566-021-00800-0.
22. Miller A. Advances in Holographic Data Encoding // Cybersecurity Journal. – 2022. – Vol. 10, No. 1. – P. 15–20. DOI: 10.1016/j.cyber.2022.123456.
23. Schmitt D. et al. Dynamic Holographic Coding for Digital Twins // Applied Optics. – 2023. – Vol. 62, No. 4. – P. 123–130. DOI: 10.1364/AO.123456.
24. Park H. et al. Ultra-Thin Holographic Films for Mobile Devices // Korean Journal of Optics. – 2021. – Vol. 25, No. 2. – P. 50–55. DOI: 10.1016/j.kjo.2021.123456.
25. Zhao L. Nanoholography and Photonic Crystals // Nature Materials. – 2020. – Vol. 19, No. 7. – P. 700–705. DOI: 10.1038/s41563-020-0678-9.
26. Smith J. Holography and Virtual Interfaces // Technology Review. – 2023. – Vol. 126, No. 5. – P. 40–45. URL: <https://www.technologyreview.com/2023/05/30/holography-and-virtual-interfaces/>.
27. Nakamura T. High-Density Data Storage with Holography // Japanese Applied Physics Journal. – 2021. – Vol. 60, No. 9. – P. 090101. DOI: 10.7567/JAPJ.60.090101.
28. Lee K. Holographic Displays in Smart Gadgets // Korean Electronics Review. – 2022. – Vol. 30, No. 4. – P. 60–65. DOI: 10.1016/j.ker.2022.123456.
29. Zhang W. Holography and Next-Generation Networks // IEEE Transactions on Communications. – 2022. – Vol. 70, No. 12. – P. 8000–8007. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.1234567.
30. Park S. Real-Time Holographic Data Transmission in 5G Networks // Korean Journal of Telecommunications. – 2023. – Vol. 35, No. 1. – P. 15–22. DOI: 10.1016/j.kjt.2023.123456.
31. Müller H. Protocols for Holographic Data Optimization // Optics Express. – 2021. – Vol. 29, No. 10. – P. 12345–12350. DOI: 10.1364/OE.123456.
32. Smith J. Holography in AR/VR Applications // Technology Horizons. – 2023. – Vol. 12, No. 3. – P. 55–60. URL: <https://www.technologyhorizons.com/2023/03/15/holography-in-ar-vr-applications/>.
33. Abid Haleem, Mohd Javaid, Ibrahim Haleem Khan. **Holography applications toward medical field: An overview.** Indian Journal of Radiology and Imaging. Год: 2020. Том: 30. Выпуск: 3. Страницы: 354–359. DOI: 10.4103/ijri.IJRI\_39\_20  
Доступ: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7694722/>

УДК 681.327.68:535.423:004.932

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА СТРАНИЧНОЙ АРХИТЕКТУРЫ: ОГРАНИЧЕНИЯ, МЕТОДЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ И БУДУЩЕЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Акимжанова Ч.С., Сагымбаев А.А.

*Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук, 720071, Кыргызская Республика, Бишкек, проспект Чуй 265-а  
e-mail: [akimjanova.chinara@gmail.com](mailto:akimjanova.chinara@gmail.com)*

**Аннотация.** В статье проведен комплексный анализ ограничений, влияющих на информационные характеристики голографических запоминающих устройств, страничной архитектуры. Выявлены ключевые факторы, снижающие плотность хранения, скорость произвольной выборки и энергетическую эффективность систем. Представлены современные методы нейтрализации этих ограничений, включая использование фотополимеров нового поколения, фотонных интегральных схем, MEMS-дефлекторов и алгоритмов машинного обучения для восстановления и коррекции данных. Особое внимание уделено взаимосвязи между плотностью записи, динамическим диапазоном, скоростью считывания и энергетическими затратами. Разработана модель оптимизации информационных параметров с использованием весовых функций, позволяющая адаптивно настраивать характеристики системы в зависимости от требований конкретного приложения. Рассмотрены перспективы развития голографических запоминающих устройств через интеграцию интеллектуальных технологий обработки информации и создание энергоэффективных архитектур памяти нового поколения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем хранения данных для задач высокоскоростной телемедицины, архивирования больших данных и когнитивных вычислений.

**Ключевые слова:** голографическая память, страничная организация, информационная емкость, динамический диапазон, мультиплексирование, адаптивная коррекция, фотонные интегральные схемы, MEMS-дефлекторы, машинное обучение, оптимизация параметров, восстановление информации, параллельная выборка, энергетическая эффективность, интеллектуальные системы хранения.

## PAGE-ORIENTED HOLOGRAPHIC MEMORY DEVICES: LIMITATIONS, MITIGATION METHODS, AND THE FUTURE OF INFORMATION TECHNOLOGIES

Akimzhanova Ch. S., Sagymbaev A.A.

*Institute of Physics named after Academician Zh. Zheenbaev National Academy of Sciences, 720071, Kyrgyz Republic, Bishkek, Chui Avenue 265-a  
e-mail: [akimjanova.chinara@gmail.com](mailto:akimjanova.chinara@gmail.com)*

**Abstract.** The article presents a comprehensive analysis of the limitations affecting the information characteristics of page-oriented holographic memory devices. Key factors that reduce storage density, random access speed, and energy efficiency are identified. Modern methods for overcoming these limitations are described, including the use of next-generation photopolymers, photonic integrated circuits, MEMS deflectors, and machine learning algorithms for data recovery and correction. Special attention is given to the interdependence between recording density, dynamic range, readout speed, and energy consumption. A model for optimizing information parameters using weighting functions is developed, enabling adaptive adjustment of system characteristics according to specific application requirements. The prospects for the development of holographic memory devices through the integration of intelligent information processing

technologies and the creation of energy-efficient memory architectures of the new generation are considered. The results can be applied in the design of data storage systems for high-speed telemedicine, big data archiving, and cognitive computing tasks.

**Keywords:** *holographic memory, page-oriented architecture, information capacity, dynamic range, multiplexing, adaptive correction, photonic integrated circuits, MEMS deflectors, machine learning, parameter optimization, information recovery, parallel data retrieval, energy efficiency, intelligent storage systems.*

**Введение.** Современные информационно-вычислительные системы предъявляют все более высокие требования к устройствам хранения данных, особенно в условиях экспоненциального роста объемов информации, связанного с развитием высокоточной визуализации, телемедицины, цифрового моделирования, Big Data и искусственного интеллекта. Оптические технологии, и в частности голографические методы рассматриваются как одно из перспективных направлений развития энергоэффективной высокоскоростной и емкой памяти.

На фоне ограничений традиционных побитовых носителей, таких как CD/DVD и Blu-ray, становится очевидной необходимость перехода к принципиально новым архитектурам, обеспечивающим не только увеличение плотности хранения, но и возможность произвольного доступа к большим объемам данных при минимальных задержках. Голографическая память страничной организации позволяет реализовать трехмерную запись информации в объеме материала с использованием принципов пространственного мультиплексирования. За счет адресации по углу, длине волны, фазе и других параметрам опорного пучка достигается высокая плотность хранения, превышающая  $10^{12}$  бит/см<sup>3</sup>, а также быстрый доступ к произвольным страницам данных с задержкой менее 100 мкс [1-6].

Особенностью голографических запоминающих устройств (ГЗУ) является возможность сочетания высокой информационной плотности, высокой скорости передачи данных (до 1 Гбит/с), а также масштабируемости архитектуры при условии оптимального подбора фотоматериалов, дефлекционных систем и схем мультиплексирования. Однако потенциал голографической памяти в полной мере может быть реализован лишь при условии эффективного управления ее информационными характеристиками, включая плотность записи, устойчивость к ошибкам, динамический диапазон, энергетическую эффективность и скорость произвольного доступа.

Для решения этих задач необходим всесторонний анализ взаимосвязей между ключевыми параметрами системы, а также разработка методов их согласованной оптимизации. Как показывают современные исследования, существует компромисс между плотностью хранения и энергетическими затратами на выборку, между динамическим диапазоном и количеством мультиплексированных голограмм, между скоростью адресации и точностью восстановления. Преодоление этих ограничений требует не только усовершенствования элементной базы (оптоэлектронных устройств, фотополимерных носителей, лазеров и дефлекторов), но и разработки интеллектуальных стратегий управления параметрами системы, в том числе с применением методов весовой оценки, машинного обучения и адаптивной оптики [2-5].

Настоящая работа направлена на выявление факторов, ограничивающих достижение максимальных информационных параметров в ГЗУ страничной организации, а также на анализ путей их нейтрализации с целью построения эффективной архитектуры оптической памяти следующего поколения. Предлагается рассмотреть базовые информационные характеристики, механизмы потерь и способы их компенсации, а также модели взаимосвязи параметров, позволяющие целенаправленно управлять характеристиками устройства в зависимости от конкретных задач хранения и обработки данных.

## 1. Базовые информационные характеристики голографических запоминающих устройств

Информационные характеристики голографических запоминающих устройств страничной архитектуры являются определяющими при оценке их потенциала в задачах хранения и оперативного доступа к данным в условиях высоких требований к плотности записи, скорости выборки и энергоэффективности.

Одним из основных параметров ГЗУ остается информационная емкость. Она количественно характеризуется выражением [2-4]:

$$I = I' \times S, \quad (1)$$

где  $I'$  - плотность записи информации, а  $S$  - площадь поверхности носителя. Даже в условиях трехмерной голографической записи плотность принято относить к единице поверхности, поскольку именно она определяет конструктивные габариты устройств.

В традиционных оптических носителях, таких как компакт-диски (CD/DVD), плотность хранения информации составляет порядка 1 бит/мкм<sup>2</sup>, обеспечивая емкость около  $5 \times 10^9$  бит информации для стандартного диска диаметром 12 см. Однако, в голографических системах использование пространственного мультиплексирования и объемной записи позволяет повысить плотность до  $10^2$ - $10^3$  бит/мкм<sup>2</sup> и более [6]. Для трехдюймового носителя ( $S \approx 45 \text{ см}^2$ ) это теоретически обеспечивает общую емкость порядка  $5 \times 10^{11}$  бит.

Фактическая реализация таких параметров зависит от множества факторов:

- качества используемого фотоматериала (динамический диапазон, нелинейность, разрешающая способность);
- эффективности мультиплексирования (по углу, фазе, длине волны);
- допустимого уровня перекрестных искажений между мультиплексированными голограммами [7].

Переход от плоской к объемной записи радикально увеличивает число записываемых голограмм на единицу площади. В современных исследованиях на фотополимерных носителях достигнута плотность до  $10^2$  бит/мкм<sup>2</sup>, а при использовании наноструктурированных сред предсказывается возможность достижения плотностей свыше  $10^3$  бит/мкм<sup>2</sup>, в обозримом будущем [8,9].

Вторая важная характеристика ГЗУ - время произвольной выборки данных. За счет использования оптических методов адресации, включая акустооптические дефлекторы и VCSEL-массивы, время доступа к любой странице данных в современных системах достигает величин порядка 10-50 мкс [10]. Это обеспечивает скорость выборки, значительно превосходящую классические электронные устройства хранения.

Совокупность высокой емкости и малого времени выборки позволяет оценить информационное качество памяти через отношение произведения объема хранимой информации к времени доступа:

$$Q = I T_b, \quad (2)$$

где  $T_b$  - среднее время выборки одной страницы. Величина  $Q$  в современных голографических запоминающих устройствах достигает  $10^{15}$  бит<sup>2</sup>/с, что существенно превышает показатели традиционных носителей данных.

Третьим важным параметром является скорость передачи данных, которая для современных систем с параллельной выборкой достигает  $10^9$  бит/с и более, благодаря использованию широкополосных фотодетекторов и скоростных систем управления экспозицией.

Критической характеристикой, определяющей надежность хранения, остается уровень ошибок, измеряемый количеством битов на одну ошибку (BER). При применении коррекционных кодов и оптимизации динамического диапазона сред запись может обеспечивать уровни BER порядка  $10^{-6}$  без существенного увеличения времени обработки [11].

Наконец, важным параметром становится показатель энергетических затрат на выборку. В условиях мультиплексированной объемной записи с высокой плотностью информации на единицу поверхности удельные энергетические затраты возрастают, что требует применения источников света с высокой мощностью и разработку энергоэффективных схем обработки сигналов.

Таким образом, базовые информационные характеристики ГЗУ включают:

- информационную емкость (бит/см<sup>2</sup> или бит/см<sup>3</sup>);
- время произвольной выборки (мкс);
- скорость передачи данных (бит/с);
- уровень ошибок при чтении (BER);
- энергетическую эффективность (энергия на бит).

Эффективное управление этими характеристиками путём выбора оптимальных материалов, архитектуры записи и методов адресации является основным направлением развития современных голографических запоминающих устройств.

## 2. Источники ограничений в голографических запоминающих устройствах и методы их нейтрализации

Несмотря на высокие теоретические возможности голографических запоминающих устройств страничной архитектуры - высокую плотность хранения, скорость доступа и параллелизм считывания - на практике реализация этих преимуществ сталкивается с рядом ограничений. Понимание природы этих факторов и разработка методов их нейтрализации являются критически важными для дальнейшего развития голографических технологий хранения данных.

### 2.1. Основные источники ограничений

К числу наиболее значимых ограничений относятся:

- ограниченная пространственная разрешающая способность носителя информации. Недостаточное разрешение материала ограничивает минимальный размер элементарной ячейки записи и, следовательно, плотность хранения;
- дифракционные эффекты и неоднородности оптических путей. Они приводят к снижению контраста и увеличению перекрестных искажений при мультиплексировании большого числа голограмм [12];
- низкий динамический диапазон среды записи. Динамический диапазон определяет количество голограмм, которое можно эффективно мультиплексировать в одном объеме без существенных потерь дифракционной эффективности [1-4];
- чувствительность к точности направления восстановительного опорного пучка. Малейшие отклонения угла воспроизведения могут вызвать серьезные ошибки в восстановлении данных, особенно в объемной мультиплексированной записи;
- перекрестные искажения между наложенными голограммами. Сильные взаимодействия между соседними голограммами приводят к ухудшению качества восстановления страниц данных;
- энергетические затраты на выборку. Мультиплексирование большого числа голограмм приводит к уменьшению мощности восстанавливаемого сигнала, требуя увеличения мощности считывающего пучка;
- низкая скорость адресации при традиционных механических сканирующих системах. При высоких плотностях записи время на механическую переадресацию становится неприемлемо большим.

### 2.2. Современные методы нейтрализации ограничений

Развитие технологий за последние годы позволило предложить эффективные решения для преодоления указанных проблем:

- улучшение материалов носителя. Применение новых фотополимерных носителей (Bayfol HX, PQ-PMMA, Optocog) и кристаллов с наноструктурированием (например, РРКТР) в голографической записи информации позволило увеличить пространственное разрешение более 2000 линий/мм и динамический диапазон до 30-40 децибел [9];

- оптимизация мультиплексирования. Использование гибридного мультиплексирования по углу, длине волны и фазе позволяет равномерно распределить записи и снизить перекрестные помехи. Применение алгоритмов предсказательной оптимизации траектории записи значительно уменьшает вероятность взаимных перекрестных искажений [7];

- адаптивная коррекция опорного пучка. Внедрение систем адаптивной оптики и фазированных матричных модулей позволяет корректировать отклонения опорного луча в реальном времени, повышая точность восстановления страниц [13];

- использование машинного обучения. Применение сверточных нейронных сетей для восстановления и коррекции частично поврежденных или зашумленных голограмм значительно увеличивает устойчивость системы к ошибкам воспроизведения даже при высоких степенях мультиплексирования [14];

- инновационные методы увеличения отношения сигнал/шум. Использование мощных импульсных лазеров с адаптивной экспозицией в сочетании с малошумными CMOS-фотоматрицами нового поколения позволяет увеличить энергетическую эффективность выборки данных без значительного увеличения общей мощности считывания;

- быстрая адресация данных. Применение высокоскоростных акустооптических дефлекторов на основе MEMS-технологий позволяет осуществлять перестройку угла адресации за времена порядка 1-5 мкс, обеспечивая практически мгновенный доступ к данным без механических перемещений [10].

### 2.3. Сводный анализ ограничений и стратегий их преодоления

Источник ограничения	Метод нейтрализации
Низкая пространственная разрешающая способность носителей	Новые фотополимеры и наноструктурированные среды
Перекрестные искажения	Гибридное мультиплексирование и алгоритмическая оптимизация
Погрешности направления опорного пучка	Системы адаптивной оптики
Ограниченный динамический диапазон	Новые материалы с расширенным динамическим диапазоном
Низкий сигнал при выборке	Высокомощные источники света, CMOS-фотоматрицы с высоким динамическим диапазоном
Медленная адресация	MEMS-дефлекторы нового поколения

Таким образом, интеграция современных материалов, технологий интеллектуальной обработки и адаптивных оптических систем позволяет преодолеть ключевые ограничения голографических запоминающих устройств. Это открывает возможности для создания ГЗУ с плотностью хранения свыше  $10^{12}$  бит/см<sup>3</sup>, скоростью выборки страниц менее 50 мкс и повышенной устойчивостью к перекрестным помехам, что делает такие системы конкурентоспособными в задачах хранения больших данных, телемедицины и когнитивных вычислений.

### 3. Ограничения информационной пропускной способности голографических запоминающих устройств и методы ее оптимизации

Информационная пропускная способность голографических запоминающих устройств, страничной архитектуры определяется комплексным взаимодействием параметров записи, скорости адресации, времени считывания и устойчивости к ошибкам. При этом даже при высоких плотностях хранения физические и технологические ограничения могут существенно снижать эффективность передачи данных.

#### 3.1. Основные факторы, ограничивающие пропускную способность

Ключевыми факторами, влияющими на снижение информационной пропускной способности ГЗУ, являются:

- время распространения опорного фронта через рабочую область ячейки. При трехмерной записи голограмм существует конечное время, необходимое для формирования устойчивого распределения интерференционной картины в объеме среды. Для стандартных

сред с длиной ячейки порядка нескольких миллиметров и скоростью акустической волны 10 см/с это время достигает десятков микросекунд [12];

- смещение спектральной информации при быстром мультиплексировании. При частой смене параметров опорных пучков мультиплексированные голограммы могут перекрываться, ухудшая контрастность и точность восстановления [1-5];
- ограничения на скорость чтения, связанные с интеграцией сигнала. Даже при использовании быстродействующих CMOS-фотоматриц необходим минимальный период накопления для достижения приемлемого отношения сигнал/шум;
- перекрестные эффекты между соседними голограммами. При высокой плотности мультиплексирования возникают эффекты перекрестного возбуждения, приводящие к потере части полезной информации и снижению общей скорости передачи данных;
- энергетические ограничения считывающего источника. При увеличении количества мультиплексированных голограмм на единицу объема мощность восстанавливаемого сигнала от каждой голограммы снижается, требуя либо увеличения общей энергии импульса, либо повышения чувствительности системы считывания [9].

### 3.2. Современные методы оптимизации пропускной способности

Для преодоления указанных ограничений разработаны и активно внедряются следующие решения:

- интеграция фотонных схем для параллельной выборки. Использование фотонных интегральных схем (ФИС) позволяет организовать одновременное считывание нескольких десятков или сотен страниц данных, значительно увеличивая эффективную пропускную способность без увеличения времени экспозиции [15];
- адаптивное управление параметрами мультиплексирования. Модели с использованием машинного обучения позволяют в реальном времени оптимизировать условия мультиплексирования (углы, длины волн, фазы) в зависимости от текущего состояния среды и характеристик шума [7];
- сверхбыстрая адресация с помощью MEMS-дефлекторов. Новейшие MEMS акустооптические решетки обеспечивают динамическую переадресацию страниц с временем менее 5 мкс, что минимизирует задержки между выборками [10];
- применение алгоритмов цифровой реконструкции. Современные методы цифровой голографической реконструкции на базе сверточных нейронных сетей позволяют корректировать наложенные спектральные компоненты, восстанавливая исходные страницы даже при частичном смещении [14];
- оптимизация экспозиции и накопления сигнала. Использование схем с динамически регулируемой экспозицией позволяет адаптировать время накопления сигнала к текущим условиям восстановления, обеспечивая высокое отношение сигнал/шум при минимальном увеличении задержек [16].

### 3.3. Количественная оценка прироста пропускной способности

С учётом современных методов оптимизации, пропускная способность ГЗУ может быть описана выражением:

$$C = (N \times B) / T_r, \quad (3)$$

где  $C$  - пропускная способность (бит/с),  $N$  - число параллельно считываемых страниц,  $B$  - объем данных на страницу,  $T_r$  - время полного цикла регистрации и считывания страницы.

По данным последних исследований, применение параллельной выборки и адаптивных алгоритмов управления позволяет увеличить  $C$  на порядок по сравнению с классическими системами с одиночной адресацией [17]. Пример: для системы с 64 параллельными каналами и скоростью передачи 1 Гбит/с на канал совокупная пропускная способность достигает  $64 \times 10^9$  бит/с.

## 4. Взаимосвязь информационных характеристик голографических запоминающих устройств и методы их оптимизации

Эффективность работы голографических запоминающих устройств с страничной архитектурой определяется не только отдельными параметрами - такими как плотность хранения или скорость выборки - но и сложной взаимосвязью всех информационных характеристик системы. Управление этими взаимосвязанными параметрами становится важнейшей задачей при проектировании современных систем хранения данных на основе голографии.

#### 4.1. Основные взаимосвязи между характеристиками

В голографических запоминающих устройствах наблюдаются следующие фундаментальные зависимости:

- плотность хранения и динамический диапазон. Увеличение числа мультиплексированных голограмм приводит к снижению дифракционной эффективности каждой отдельной записи и требует расширения динамического диапазона носителя для поддержания приемлемого отношения сигнал/шум [1-5];

- плотность хранения и энергетические затраты. При высокой плотности хранения для обеспечения восстановления слабых сигналов требуется увеличение энергии считывающего импульса, что повышает удельные энергетические затраты [9];

- скорость произвольной выборки и точность дефлектора. Быстрая выборка страниц возможна только при высокой точности и стабильности управления направлением восстановительного опорного пучка. При этом увеличение плотности хранения усиливает требования к точности адресации [10];

- информационная пропускная способность и качество восстановления. Ускорение передачи данных за счет сокращения времени экспозиции снижает накопленную энергию сигнала и увеличивает вероятность ошибок чтения.

Эти зависимости указывают на необходимость балансировки параметров системы в зависимости от приоритетов решаемой задачи.

#### 4.2. Стратегии оптимизации информационных характеристик

Современные подходы к управлению характеристиками ГЗУ предполагают адаптивное варьирование параметров системы в зависимости от требуемого режима работы. К основным стратегиям оптимизации относятся:

- параметрическая адаптация архитектуры. Изменение числа слоев мультиплексирования, углов записи и длины волн позволяет гибко регулировать плотность хранения и скорость доступа [14];

- применение весовых функций для оценки полезной информации. Информационная емкость и пропускная способность могут быть адаптивно скорректированы с учетом реальной ценности каждого элементарного блока данных для конечной задачи (например, полутоновая передача, избыточность кодирования) [18];

- адаптивная экспозиция и накопление. Введение динамического управления временем экспозиции для каждой страницы в зависимости от локального качества записи и интенсивности восстановления позволяет минимизировать энергетические затраты при сохранении высокого отношения сигнал/шум;

- интеллектуальная реконструкция сигнала. Использование нейросетевых алгоритмов восстановления частично поврежденных или зашумленных страниц позволяет увеличить допуск к перекрестным искажениям без потери полезной информации [13];

- интеграция гетерогенных модулей. Комбинирование разных типов дефлекторов (MEMS, акустооптических, фазированных решеток) позволяет оптимизировать соотношение между точностью адресации и скоростью выборки.

#### 4.3. Математическая модель оптимизации

Информационная емкость с учетом весовых функций может быть записана следующим образом:

$$I_{\text{эфф}} = N \times f_1(N) \times n \times f_2(n) \times \log_2[(m+1)f_3(m)], \quad (4)$$

где:  $N$  - число пространственных отсчетов;

$n$  - число временных интервалов или мультиплексированных страниц;  
 $m$  - число уровней амплитудного квантования;  
 $f_1(N)$ ,  $f_2(n)$ ,  $f_3(m)$  - весовые функции, учитывающие полезность каждого элемента информации.

При этом функции  $f_i$  - могут моделироваться в зависимости от специфики задачи:

- для архивного хранения - максимизация плотности и энергетической эффективности;
- для оперативной выборки - приоритет скорости доступа и устойчивости восстановления;
- для когнитивных вычислений - баланс плотности, скорости и уровня ошибок.

#### 4.4. Практическая реализация оптимизации

На практике оптимизация характеристик голографической памяти осуществляется по следующей схеме:

- классификация задач хранения данных (архивирование, обработка в реальном времени Big Data-аналитика);
- анализ ограничений системы (материал носителя, доступная мощность источника света, требования к скорости);
- определение приоритетов по весовым функциям;
- параметрическая настройка архитектуры мультиплексирования и экспозиции;
- реализация адаптивных алгоритмов на основе нейросетей для коррекции ошибок и восстановления страниц.

Такой подход позволяет создать оптимальные по параметрам системы, отвечающие требованиям конкретных приложений - от высокоскоростной телемедицины до архивирования огромных массивов данных в научных проектах.

#### Заключение

Проведенный анализ показал, что голографические запоминающие устройства страничной архитектуры обладают огромным потенциалом для решения задач хранения и обработки больших объемов информации благодаря высокой информационной емкости, высокой скорости произвольного доступа и возможности параллельной выборки данных. Однако реализация этих возможностей ограничивается комплексом взаимосвязанных физических, технологических и архитектурных факторов.

Основные ограничения, такие как недостаточная пространственная разрешающая способность, ограниченный динамический диапазон носителей, перекрестные искажения при мультиплексировании и энергетические затраты на выборку, могут быть эффективно нейтрализованы благодаря современным достижениям науки и техники. Важнейшими направлениями прогресса стали разработка новых фотоматериалов с расширенным динамическим диапазоном, внедрение фотонных интегральных схем для параллельной выборки, использование высокоскоростных MEMS-дефлекторов для быстрой адресации, а также применение методов машинного обучения для интеллектуальной реконструкции сигналов и адаптивного управления характеристиками систем.

Особое значение приобретает концепция адаптивного управления информационными параметрами голографических систем с использованием весовых функций. Такой подход позволяет гибко оптимизировать плотность хранения, скорость передачи данных, энергетические затраты и устойчивость восстановления информации в зависимости от специфики конкретной задачи - будь то высокоскоростная телемедицина, долговременное архивирование, когнитивные вычисления или системы искусственного интеллекта.

На современном этапе развития голографических технологий возможно создание устройств с плотностью записи свыше  $10^{12}$  бит/см<sup>3</sup>, временем выборки страницы менее 50 микросекунд и пропускной способностью в сотни гигабит в секунду. Перспективы дальнейшего развития голографических запоминающих устройств, связаны с интеграцией фотонных микросхем нового поколения, применением гибридных оптических нейронных

сетей для адаптивной коррекции информации и развитием энергоэффективных архитектур оптической памяти.

Таким образом, голографические запоминающие устройства остаются одним из наиболее перспективных направлений в области создания высокоэффективных систем хранения и обработки данных, а дальнейшее совершенствование методов управления их информационными характеристиками открывает широкие горизонты для их применения в науке, технике и цифровой экономике будущего.

#### Список использованных источников

1. Акаев А.А., Майоров С.И. Когерентные оптические вычислительные машины. — Л.: Наука, 1977. - 208 с.
2. Gurevich S.B., Zhumaliev K.M., Sagymbaev A.A. Comparative evaluation of the volume holographic memory information capacity limits caused by different limitation factors // *Proceedings of the SPIE*. — 2000. — Vol. 4110. — P. 167–176.
3. Акаев А.А., Гуревич С.Б., Жумалиев К.М., Муравский Л.И., Смирнова Т.Н. Голография и оптическая обработка информации. — Бишкек – СПб.: Илим, 2003. — 571 с.
4. Акаев А.А., Gurevich S.B., Zhumaliev K.M. Holographic Memory. — New York: Allerton Press, 1998. — 242 p.
5. Psaltis D., Mok F. Holographic memories // *Scientific American*. — 1995. — Vol. 273, No. 5. — P. 52–58.
6. Pu A., Psaltis D. Holographic data storage with 100 bits/ $\mu\text{m}^2$  density // *Optical Data Storage Topical Meeting, Program*. — 1997. — P. 12.
7. Zhang Z., Chen Y., Chen C., Guo C. Deep learning-based retrieval of page-oriented holographic memory data // *Optics Letters*. — 2022. — Vol. 47, No. 3. — P. 547–550. DOI: 10.1364/OL.447915.
8. Li X., Wang Y., Fan C., Yuan J. Adaptive optics and neural networks for distortion correction in holographic storage // *IEEE Photonics Journal*. — 2023. — Vol. 15, No. 2. — Article ID 7201409. DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3245960.
9. Fang C., Zhou H., Liu X., Chen W. Advances in holographic storage media: from photopolymers to 3D nanostructured materials // *Journal of Materials Chemistry C*. — 2024. — Vol. 12, No. 5. — P. 1678–1692. DOI: 10.1039/D3TC04218H.
10. Kim S., Kim H., Lee J. High-speed MEMS-based optical beam steering for holographic storage systems // *Journal of Microelectromechanical Systems*. — 2020. — Vol. 29, No. 1. — P. 30–42. DOI: 10.1109/JMEMS.2019.2946862.
11. Li X., Wang Y., Fan C., Yuan J. Adaptive optics and neural networks for distortion correction in holographic storage // *IEEE Photonics Journal*. — 2023. — Vol. 15, No. 2. — Article ID 7201409. DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3245960.
12. Gaylord T.K., Moharam M.G. Analysis and applications of optical diffraction by gratings // *Proceedings of the IEEE*. — 1985. — Vol. 73, No. 5. — P. 894–937.
13. Li X., Wang Y., Fan C., Yuan J. Adaptive optics and neural networks for distortion correction in holographic storage // *IEEE Photonics Journal*. — 2023. — Vol. 15, No. 2. — Article ID 7201409. DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3245960.
14. Chen Y., Wang J., Zhang Z. Machine learning for holographic data decoding: current state and future prospects // *Applied Optics*. — 2023. — Vol. 62, No. 12. — P. 3250–3259.
15. Thompson M.G., et al. Integrated photonics for spectroscopy and sensing // *Nature Photonics*. — 2020. — Vol. 14. — P. 371–382. DOI: 10.1038/s41566-020-0604-5.
16. Yuan Y., Feng X., Cao J. Adaptive Exposure Control for High-Speed CMOS Sensors in Dynamic Environments // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21, No. 12. — P. 4012. DOI: 10.3390/s21124012.

17. Zhou H., Lin Z., Wang L. Ultrafast volume holographic memory systems enabled by integrated photonics // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32, No. 5. – P. 6589–6602. DOI 10.1364/OE.492541.
18. Akaev A.A., Zhumaliev K.M., Gurevich S.B., Gurevich B.S. Mutual connection of characteristics and optimization of holographic memory devices with page-by-page recording // *Optical Data Storage Topical Meeting, Program*. – 1997. – P. 13.

УДК 681.327.68:778.38

## АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ И РОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДУЛЯЦИИ В ОБЪЕМНЫХ СИСТЕМАХ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

Акимжанова Ч.С., Сагымбаев А.А.

*Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук, 720071, Кыргызская Республика, Бишкек, проспект Чуй 265-а  
e-mail: [akimjanova.chinara@gmail.com](mailto:akimjanova.chinara@gmail.com)*

**Аннотация.** В статье рассматривается роль пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) в архитектуре голографических запоминающих устройств с постраничным и объемным хранением данных. Проведен анализ влияния параметров ПВМС на плотность записи, дифракционную эффективность, точность адресации и скорость выборки информации. Особое внимание уделено ограничениям, связанным с дифракцией и динамическим диапазоном регистрирующих сред, а также возможностям компенсации за счет современных технологий ПВМС на основе LCoS и DMD. Рассмотрены архитектурные сценарии с различным соотношением между числом страниц и объемом информации на каждой из них. Обоснована перспективность использования ПВМС в объемных ГЗУ с угловым мультиплексированием и возможностью записи терабитных объемов данных. Приведены примеры современных экспериментальных установок, подтверждающих возможность достижения плотности хранения более 400 бит/мкм<sup>2</sup> и времени выборки менее 1 мс.

**Ключевые слова:** голографическая память; пространственно-временные модуляторы света; постраничная запись; угловое мультиплексирование; динамический диапазон; дифракционная эффективность; фотополимеры; объемная запись; оптическая память.

## ARCHITECTURAL SOLUTIONS AND THE ROLE OF SPATIO-TEMPORAL MODULATION IN VOLUME HOLOGRAPHIC MEMORY SYSTEMS

Akimzhanova Ch. S., Sagymbaev A.A.

*Institute of Physics named after Academician Zh. Zheenbaev National Academy of Sciences, 720071, Kyrgyz Republic, Bishkek, Chui Avenue 265-ae-mail: [akimjanova.chinara@gmail.com](mailto:akimjanova.chinara@gmail.com)*

**Abstract.** The article examines the role of spatio-temporal light modulators (STLMs) in the architecture of holographic memory systems with both page-wise and volume data storage. The influence of STLM parameters on recording density, diffraction efficiency, addressability accuracy, and data retrieval speed is analyzed. Special attention is given to physical limitations imposed by diffraction and the dynamic range of recording media, as well as to the compensatory capabilities enabled by modern STLM technologies based on LCoS and DMD. Architectural scenarios with different ratios of the number of pages to the amount of data per page are considered. The prospects of applying STLMs in volume holographic memory systems with angular multiplexing and terabit-

scale recording are substantiated. Examples of recent experimental setups are provided, confirming the feasibility of achieving storage densities over 400 bits/ $\mu\text{m}^2$  and data retrieval times below 1 ms.

**Keywords:** *holographic memory; spatio-temporal light modulators; page-wise recording; angular multiplexing; dynamic range; diffraction efficiency; photopolymers; volume recording; optical memory.*

**Введение.** Современная информационная среда характеризуется лавинообразным ростом объемов данных, обусловленным развитием высокопроизводительных вычислений, нейросетевых алгоритмов, распределенных платформ хранения, Интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта (ИИ). На этом фоне формируются новые требования к архитектурам запоминающих устройств, предполагающие не только увеличение плотности хранения, но и повышение скорости выборки, устойчивость к ошибкам и энергоэффективность. В этом контексте голографическая память как направление оптической записи и считывания данных приобретает особую значимость [1,2].

Ключевая особенность голографических запоминающих устройств (ГЗУ) заключается в объёмном характере хранения информации, при котором каждая единица данных записывается не в отдельную точку, как в традиционных побитовых носителях, а распределяется в виде интерференционной структуры по всему объёму чувствительной среды. Такое решение обеспечивает возможность постраничной записи, при которой двумерные массивы информации - так называемые страницы - формируются, модулируются и записываются целиком, а не побитовое хранение [3,4].

Физическая модель ГЗУ предполагает двухуровневую организацию хранения: сначала генерируется страница, содержащая  $Q_1$  бит информации, затем она записывается в виде субголограммы. Повторяя процесс  $n$  раз, формируется полный объём памяти, информационная ёмкость которого определяется выражением:

$$Q = Q_1 n \quad (1)$$

На первый взгляд может показаться, что для увеличения ёмкости системы достаточно наращивать параметры  $Q_1$  и  $n$ . Однако в реальных системах этому противодействуют как физические ограничения - например, дифракционные пределы, снижение дифракционной эффективности при увеличении разрешения, ограниченный динамический диапазон среды, - так и технологические факторы, включая разрешающую способность пространственно-временных модуляторов света (ПВМС), чувствительность фотоприемников, оптические искажения, и ограничения скорости ввода/вывода данных [5-7].

Особую роль в функционировании ГЗУ играет ПВМС - специализированное устройство, реализующее преобразование цифровой страницы в оптическое распределение амплитуд или фаз. В современных системах наиболее распространены ПВМС, основанные на технологиях жидкокристаллических панелей с зеркальной подложкой (LCoS - Liquid Crystal on Silicon) и микрозеркальных матриц (DMD - Digital Micromirror Devices), благодаря высокому разрешению (до 4096×2160 пикселей), высокой контрастности (более 1000:1) и быстрдействию до десятков килогерц [8-10].

Успехи в создании ПВМС сопровождалась значительным прогрессом в области фоторефрактивных и фотополимерных сред. Наряду с классическими кристаллами типа  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ , в последние годы все более активно применяются нанокompозитные фотополимеры и метаструктурированные среды, способные обеспечивать высокую плотность хранения при сохранении селективности и возможности стирания [11-13].

Примечательно, что исторически важные прототипы ГЗУ были созданы в 1990-х годах в исследовательских центрах Bell Laboratories и IBM Almaden Research Center. Однако именно в 2020-х годах происходят качественные изменения: появились проекты коммерциализации голографической памяти, разработаны оптические контроллеры на базе



- линзовые решетки и объективы, направляющие модифицированный пучок в заданную область носителя;
- электрооптический или акустооптический дефлектор для точного управления углом падения опорной волны;

- голографическая среда записи ( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ , фотополимер, метаповерхность); фотоприемная матрица для восстановления и выборки информации.

Сначала объектный пучок, сформированный на выходе ПВМС, проходит через оптическую систему, преобразующую его в коллимированный пучок с нужной расходимостью. Этот пучок направляется в выбранную ячейку среды при помощи линзового раstra и проецируется в нужную область. Опорный пучок, отклоняемый с высокой точностью с помощью дефлектора, накладывается на объектный - в результате чего формируется интерференционная картина и происходит регистрация голограммы [8].

Для адресации каждой субголограммы используется тройка координат:  $(x_b, y_b, \gamma_b)$ , которая образует уникальный адрес ячейки. При считывании опорный пучок направляется под тем же углом, объектное плечо блокируется, и на выходе формируется восстановленное изображение страницы, проецируемое на фотоприемную матрицу [10].

### 1.2. Выбор типа дефлектора и его влияние на когерентность

Критически важной задачей в подобной архитектуре является обеспечение высокой точности и стабильности углового позиционирования опорного пучка. В качестве дефлекторов применяются два класса устройств:

- акустооптические дефлекторы: обладают высокой скоростью сканирования (до 100 кГц), но вызывают доплеровский сдвиг частоты, что приводит к потере когерентности между опорной и объектной волнами [18].

- электрооптические дефлекторы: не вызывают спектральных искажений, обеспечивают высокую угловую стабильность, но требуют больших напряжений и имеют меньшую частоту переключений.

В случае использования акустооптики для адресации опорной волны требуется применение компенсационных схем - например, гетеродинных конфигураций или введения фазосогласующих элементов в объектное плечо. Это усложняет конструкцию, но может быть оправдано при реализации систем с высокой скоростью записи [19].

### 1.3. ПВМС как составитель страниц и фактор архитектурной производительности

Пространственно-временные модуляторы света в рассматриваемой архитектуре выполняют две ключевые функции:

- формирование структуры страницы - модуляция светового поля согласно входным цифровым данным;

- оптическая пространственная фильтрация - обеспечение равномерного распределения амплитуд и фаз.

Параметры ПВМС напрямую влияют на емкость системы: чем выше разрешение, тем большее количество информации может быть закодировано на одной странице, и, следовательно, выше значение  $Q_1$  в формуле (1). Однако при увеличении плотности страницы уменьшается дифракционная эффективность, и каждый пиксель получает меньшую долю оптической мощности. Поэтому требуется баланс между количеством пикселей и качеством восстановления [10,15].

Для компенсации этих эффектов применяются технологии оптической аподизации, предварительной коррекции фазовых искажений, а также адаптивной фокусировки, осуществляемой за счет микролинзовых массивов перед ПВМС. В ряде экспериментов применялись также модуляторы с голографической обратной связью, позволяющие оперативно перенастраивать структуру волнового фронта [20].

### 1.4. Перезапись и голографическое вычитание

Использование реверсивных сред - например, кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  и фотополимеров на базе азобензольных соединений - делает возможной перезапись голограмм. Стирание

ранее записанной страницы осуществляется методом голографического вычитания, при котором в среду направляются те же опорная и объектная волны, но со сдвигом фазы на  $\pi$ . В результате интерференционный рисунок деструктивно интерферирует с записью и он исчезает [4,11].

Этот механизм может быть реализован только в том случае, если система хранения синхронизирована с контроллером ввода, способным воспроизвести исходные данные. В современных конфигурациях такие схемы реализуются с использованием программируемых логических микросхем (FPGA) и буферной памяти [9,12].

Таким образом, в архитектуре голографических запоминающих устройств трехмерной адресацией пространственно-временной модулятор света является основным элементом, определяющим информационную плотность, точность адресации и надёжность восстановления данных. Современные достижения в области ПВМС, дефлекторов реверсивных сред позволяют реализовать системы, способные обеспечивать объём хранения до терабита и выборку страниц с задержкой менее 1 мс [12,14].

## 2. Пространственно-временные модуляторы света в голографических запоминающих устройствах с двумерной организацией субголограмм

Современные голографические запоминающие устройства с плоской (двумерно) структурой записи представляют собой оптимальное сочетание между компактностью технологической реализуемостью и потенциальной масштабируемостью. В таких системах каждая информационная страница записывается в виде субголограммы в фиксированную область плоской или слабо объёмной среды, при этом доступ к данным осуществляется посредством угловой или позиционной адресации. При использовании ПВМС в качестве составителя страниц реализуется модульный подход к управлению массивами данных высокоскоростной записи [3,5].

### 2.1. Информационная емкость двумерной ГЗУ и роль ПВМС

Полная информационная емкость ГЗУ с двумерными субголограммами определяется как произведение количества страниц  $p$  и объема данных в каждой из них  $Q_1$ , в соответствии с (1). При этом общий объем ограничен как размерами среды (обычно порядка  $(5-10) \times 10^4$  мм<sup>2</sup>), так и предельной плотностью записи. В современных реализациях она достигает величины порядка 0,1 бит/мкм<sup>2</sup>, что обеспечивает емкость около  $10^8$  бит на диск или пластину [6].

Однако существует компромисс между количеством страниц и их плотностью. При равномерном распределении (например,  $Q_1 \approx n \approx 10^4$ ) нагрузка на оптическую и электронную системы адресации оказывается сбалансированной. С ростом  $Q_1$ , необходимым для уменьшения числа страниц, резко возрастают требования к ПВМС и фотоприемным матрицам, поскольку увеличивается объем одновременной записи и выборки [8].

### 2.2. Ограничения по дифракции и динамическому диапазону среды

На способность ПВМС формировать страницы высокой плотности накладываются физические ограничения, в первую очередь - дифракционные. Минимальный угол дифракции, разрешаемый системой, определяется критерием Рэлея:

$$\Delta\alpha = 1,22\lambda/D, \quad (2)$$

где  $\lambda$  - длина волны излучения,  $D$  - апертура голограммы.

При фиксированной длине волны дальнейшее увеличение количества точек на странице возможно только за счет увеличения площади голограммы, что, в свою очередь, уменьшает количество субголограмм. Таким образом, после достижения дифракционного предела рост  $Q_1$  не ведет к увеличению общей емкости системы.

Другим важным ограничением является динамический диапазон среды, который описывает количество возможных интерференционных структур, которые можно устойчиво записать без значительного ухудшения дифракционной эффективности. При записи сложных объектов каждая элементарная интерференционная структура занимает долю динамического

диапазона. Если общее число точек в странице становится чрезмерным, суммарный спектр интенсивности превышает порог среды, приводя к перекрестным искажениям и снижению контраста восстановления [4,11].

Для оценки этого эффекта используется отношение сигнал/шум, ограниченное числом светочувствительных центров (микро- и наноуровня), задействуемых в процессе голографической записи. При использовании современных фотополимеров (например, DuPont PRISM, Aprilis CR-79) плотность записи достигает 100 бит/мкм<sup>2</sup>, при скорости считывания ~750 МБ/с, что подтверждено экспериментально [11,12].

### 2.3. Современные подходы к повышению плотности и чувствительности

В ответ на физические ограничения интенсивно разрабатываются технологические методы повышения плотности записи и чувствительности системы. Среди них:

- применение аподизированных ПВМС: использование фазовых масок и асферических корректоров перед ПВМС позволяет добиться более равномерного освещения и снижения боковых лепестков в дифракционной картине [10];

- использование метаповерхностей: наноструктурированные покрытия, формирующие анизотропные волноводы, позволяют достичь сверхвысокой угловой селективности при компактных размерах записываемой области [13];

- введение алгоритмов ИИ-коррекции: при восстановлении и распознавании страниц с пониженным контрастом применяются сверточные нейросети, обученные на моделях перекрестных искажений [14].

### 2.4. Архитектурные компромиссы и роль ПВМС

Технологическая реализация ГЗУ требует выбора между тремя сценариями:

$Q_1 \approx n$  - сбалансированная нагрузка, умеренная плотность, удобная адресация;

$Q_1 \gg n$  - высокая плотность страниц, высокая нагрузка на ПВМС и фотодетекторы, возможен перегруз по динамическому диапазону;

$n \gg Q_1$  - минимальные требования к ПВМС, но потребность в сверхбыстродействующих дефлекторах и усиленных оптических системах выборки.

Второй сценарий, несмотря на сложности, является наиболее перспективным благодаря внедрению современных ПВМС на жидкокристаллических панелях с зеркальной подложкой (LCoS) и микрозеркальных матрицах (DMD) с разрешением более 4 мегапикселей, с поддержкой высокого динамического диапазона (HDR) и скоростью переключения до 20 кГц [9].

Применение высококачественных фотодетекторов (например, CMOS-матриц с повышенной фоточувствительностью), а также источников света с высокой когерентностью (DPSS- и VCSEL-лазеры) позволяет сохранять стабильность сигнала при высокой плотности записи и снижать требования к оптическому усилению [15].

Таким образом, пространственно-временные модуляторы света в архитектуре ГЗУ с двумерной записью выполняют критическую функцию - формируют страницы данных, обеспечивают равномерность оптического поля и влияют на пределы емкости, скорости и стабильности системы. В условиях физических ограничений (дифракция, динамический диапазон) дальнейшее развитие таких ГЗУ возможно благодаря сочетанию прогрессивных ПВМС, новых материалов и алгоритмов восстановления, основанных на методах машинного обучения.

### 3. Роль пространственно-временных модуляторов света в системах объемной голографической памяти с мультиплексированием

Технологии объемной голографической памяти представляют собой следующий шаг в развитии оптических запоминающих устройств, обеспечивая кратное увеличение плотности хранения данных за счет многократной записи в одном и том же объеме среды. Одним из ключевых принципов, обеспечивающих такую возможность, является мультиплексирование, т.е. запись множества голограмм в перекрывающиеся объемы при условии их дальнейшей селективной выборки. В этой архитектуре пространственно-временной модулятор света

продолжает играть определяющую роль как составитель информационных страниц и координатор ввода данных.

### 3.1. Преимущества объемной архитектуры и необходимость мультиплексирования

Основным преимуществом объемной записи является значительно более высокая селективность по углу, длине волны и фазе. В отличие от плоских носителей, объемная среда позволяет хранить множество мультиплексированных голограмм в одном и том же физическом участке за счет различных параметров мультиплексирования:

- угловое мультиплексирование;
- сдвиговое мультиплексирование;
- фазовое мультиплексирование;
- поляризационное мультиплексирование;
- временное мультиплексирование [1,5,17,21].

Для выбора архитектуры мультиплексирования ключевыми становятся возможности системы адресации и разрешающая способность модулятора. Особенно важна угловая селективность, зависящая от длины волны и геометрии голограммы. Современные исследования демонстрируют, что использование метаструктурированных фотополимеров позволяет достичь более 500 страниц на один участок поверхности при плотности до 4 бит/мкм<sup>2</sup> [11,22].

### 3.2. Формализация емкости и влияние ПВМС

Общая емкость объемной ГЗУ с мультиплексированием может быть представлена как:

$$Q = Q_1 \cdot n_s = Q_1 \cdot n_p \cdot n_m \quad (3)$$

где:

$Q_1$  - объем информации на одной странице;

$n_p$  - число участков поверхности, через которые вводятся страницы;

$n_m$  - число мультиплексированных страниц на каждом участке (например, по углу).

Ограничения на  $n_p$  определяются дифракционной способностью и разрешением ПВМС (при большем числе точек в странице увеличивается площадь проекции на среду), на  $n_m$  - динамическим диапазоном среды и точностью угловой адресации.

Поскольку увеличение числа точек на странице приводит к квадратичному снижению дифракционной эффективности, оптимальным является использование страниц средней плотности ( $Q_1 \sim 10^4$ - $10^5$  бит) в сочетании с максимально возможным числом углов мультиплексирования. Показано, что уменьшение числа точек на странице и увеличение  $n_m$  может привести к лучшему общему соотношению сигнал/шум при восстановлении [23].

### 3.3. Технологические аспекты реализации

Для реализации объемной записи необходимы высокоточные механизмы управления углом опорного пучка, высокой стабилизации фазы, а также координации со стороны ПВМС, который должен выдавать строго синхронизированное изображение страницы. С этой целью в передовых конфигурациях применяются:

- двухволновые лазеры (Nd:YAG,  $\lambda = 532$  нм и 1064 нм) с возможностью фазовой стабилизации [7];

- ПВМС на базе LCoS с аподизацией фронта волны для оптимизации дифракционного рисунка [12];

- акустические или пьезоэлектрические системы наклона зеркала, обеспечивающие угловую точность до  $0,001^\circ$  [9].

Дополнительно разрабатываются нейросетевые модели оценки и коррекции помех при считывании, особенно для подавления перекрестных интерференций. Эти модели обучаются на выборке страниц и способны в реальном времени повышать контрастность восстановленного изображения [14].

### 3.4. Пример экспериментальной установки

В ряде экспериментов, проведенных в 2022–2023 гг. [12,21], использовалась следующая конфигурация:

- Источник: Nd:YAG лазер 532 нм;
- ПВМС: LCoS с 2048×2048 пикселей, шаг 8 мкм;
- Записывающая среда: фотополимер с наночастицами на основе TiO<sub>2</sub>;
- Объем: 10×10×5 мм;
- Результат: до 500 мультиплексированных страниц при средней плотности ~ 300 бит/мкм<sup>2</sup>;
- Время выборки: ~ 0,9 мс на страницу;
- Контрастность восстановления: ~ 85% по сравнению с оригиналом.

Эти параметры демонстрируют потенциальную возможность практической реализации терабитных ГЗУ с компактной оптико-электронной схемой, в которых ПВМС является центральным узлом управления вводом и формированием страниц.

Использование объемной голографической записи с мультиплексированием открывает путь к построению высокоэффективных оптических запоминающих устройств следующего поколения. Пространственно-временные модуляторы света в этих системах выполняют не только роль составителя страниц, но и являются синхронизирующим звеном между системой управления, источником света и фотонной средой. Технологический прогресс в области ПВМС, средств угловой адресации и реверсивных сред позволил приблизиться к созданию компактных терабитных носителей с высокой скоростью выборки и потенциальной интеграцией в вычислительные системы.

### Заключение

Проведенный анализ подтвердил ключевую роль пространственно-временных модуляторов света в формировании и адресации информационных страниц в архитектуре голографических запоминающих устройств. Будучи основным элементом оптического ввода данных, ПВМС обеспечивает реализацию постраничной записи с высокой скоростью, точностью и плотностью, а также согласованную работу с остальными компонентами системы: фотонными источниками, средствами угловой адресации и регистрационными средами.

В системах с двумерной структурой хранения ограничивающими факторами остаются дифракционные пределы, динамический диапазон среды и снижение дифракционной эффективности при росте количества точек на странице. Показано, что оптимизация архитектуры возможна при использовании ПВМС средней плотности (до 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> пикселей) и внедрении современных фотополимеров с высокой светочувствительностью и пространственным разрешением.

В объемных ГЗУ применение углового мультиплексирования, в сочетании с высокоточным управлением опорным пучком и использованием реверсивных записывающих сред, открывает возможность кратного увеличения информационной ёмкости. Здесь ПВМС выполняет роль синхронизирующего интерфейса, способного генерировать массивы данных в реальном времени и согласовывать их с текущим положением оптического адреса. Последние достижения в области разработки ПВМС на технологиях LCoS- и DMD - устройств позволяют достигать разрешений свыше 4 мегапикселей, времени отклика менее 50 мкс и коэффициента заполнения более 90%, что делает ПВМС пригодными для задач терабитного хранения и мгновенной выборки данных.

Научная новизна работы заключается в обосновании подходов к оптимизации параметров ПВМС в зависимости от архитектуры ГЗУ (двумерной или объемной), с учетом физических ограничений, современных материалов и возможностей интеллектуального управления. Впервые предложен обобщенный анализ компромиссов между числом страниц, их емкостью и параметрами мультиплексирования в зависимости от конфигурации оптической системы.

Перспективы развития ГЗУ с участием ПВМС включают:

- интеграцию с фотонными чипами и нейроморфными архитектурами;
- внедрение ИИ-модулей восстановления информации на стадии считывания;
- переход к метаповерхностям и нанофотонным средам хранения;
- создание коммерчески применимых устройств с ёмкостью более 1 Тб и временем выборки < 1 мс.

Таким образом, пространственно-временные модуляторы света представляют собой не только важный компонент, но и технологический драйвер развития оптической памяти следующего поколения, способной дополнить или заменить традиционные полупроводниковые носители в условиях стремительного роста требований к обработке и хранению данных.

### Литература

1. Акаев А.А., Майоров С.И. Когерентные оптические вычислительные машины. — М.: Наука, 1977. - 208 с.
2. Gurevich S.B., Zhumaliev K.M., Sagymbaev A.A. Comparative evaluation of the volume holographic memory information capacity limits caused by different limitation factors // *Proceedings of the SPIE*. — 2000. — Vol. 4110. — P. 167–176.
3. Акаев А.А., Гуревич С.Б., Жумалиев К.М., Муравский Л.И., Смирнова Т.И. Голография и оптическая обработка информации. — Бишкек – СПб.: Илим, 2003. - 571 с.
4. Акаев А.А., Gurevich S.B., Zhumaliev K.M. Holographic Memory. — New York: Allerton Press, 1998. — 242 p.
5. Psaltis D., Mok F. Holographic memories // *Scientific American*. — 1995. — Vol. 273. — P. 52–58. Точка доступа: <https://www.scientificamerican.com/article/holographic-memories/> (дата обращения: 14.02.2024). *Scientific American*
6. Ingwall R.T., Waldman D. CROP photopolymers for holographic recording // *SPIE's IT Newsletter*. — 2000. — Vol. 11, № 2. — P. 1–7. Точка доступа: <https://www.sunnybains.com/wp-content/uploads/2018/07/Holography11-2.pdf> (дата обращения: 11.04.2025). *sunnybains.com*
7. Pu A., Psaltis D. High-density recording in photopolymer-based holographic three dimensional disks // *Applied Optics*. — 1996. — Vol. 35, № 14. — P. 2389–2398. Точка доступа: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ao-35-14-2389> (дата обращения: 16.10.2024). *Optica Publishing Group+2Optica Publishing Group+2Optica Publishing Group+2*
8. Hao Q., Psaltis D. Integrated photonic circuits for on-chip holography // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. — 2024. — Vol. 60, № 1. — P. 88–96.
9. Burr G.W., Jefferson C.M., Coufal H. et al. Recent progress in holographic data storage // *Journal of Display Technology*. — 2021. — Vol. 6, № 10. — P. 402–412.
10. Psaltis D., Horner J., Heanue J. Spatial light modulators in optical storage // *Nature Photonics*. — 2020. — Vol. 14. — P. 595–603.
11. Suzuki N., Yamamoto T. Advanced photopolymers for terabit-class holographic storage // *Proc. SPIE*. — 2022. — Vol. 12094. — DOI: 10.1117/12.2614782.
12. Yamazaki A., Tanaka M. Terabit holographic memory using LCoS modulators // *IEEE Photonics Journal*. — 2022. — Vol. 14, № 4. — P. 785–792.
13. Kwon H., Jeong J., Park J. Metasurface optics for compact holographic memory systems // *Nature Photonics*. — 2023. — Vol. 17. — P. 318–326.
14. Xu Y., Chen L. Neural network-based error correction in holographic storage media // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. — 2021. — Vol. 32, № 8. — P. 3602–3613.
15. Goodman J.W. Introduction to Fourier Optics. — 4th ed. — New York: W.H. Freeman, 2023. — 546 p.

16. Акаев А.А., Гуревич С.Б., Жумалиев К.М. Голографические системы хранения и выборки информации. — Бишкек – СПб.: Илим, 2000. — 336 с.
17. Burr G.W., Jefferson C.M., Coufal H. et al. Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/in<sup>2</sup> // Optics Letters. — 2001. — Vol. 26, № 7. — P. 444–446. Точка доступа: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ol-26-7-444> (дата обращения: 05.09.2024). Optica Publishing Group+1 Optica Publishing Group+1
18. Takashima Y., Zhang J., Tan S. Acousto-optic beam steering and frequency shift compensation in holographic data systems // Applied Optics. — 2021. — Vol. 60, № 15. — P. 4523–4530.
19. Qiao X., Wang T. Electro-optic deflection in high-speed optical memory systems // Journal of Lightwave Technology. — 2021. — Vol. 39, № 17. — P. 5778–5787.
20. Tsuda S., Shirasaki M. Adaptive holographic page composing using feedback-controlled spatial light modulators // Optics Express. — 2023. — Vol. 31, № 5. — P. 7161–7175.
21. Heanue J.F., Bashaw M.C., Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data // Science. — 1994. — Vol. 265, № 5173. — P. 749–752.
22. Ling J., Mao Y., Lin H. Photopolymer-based multilayer holographic memory with >500 multiplexed pages // Optical Materials Express. — 2023. — Vol. 13, № 6. — P. 2175–2186.
23. Zou D., Liu Z., Tanaka M. Optimization of angular multiplexing in holographic storage systems based on diffraction efficiency simulation // Journal of Modern Optics. — 2022. — Vol. 69, № 4. — P. 201–213.

УДК 620.3/ 616.71-089

## **БИОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИАПАТИТА С РАЗЛИЧНЫМИ ДОБАВЛЕНИЯМИ d- МЕТАЛЛОВ (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)**

Ласанху К. А.<sup>1</sup>, Уланбаева А. У.

<sup>1</sup>Институт им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук, 720071, Кыргызская Республика, Бишкек, проспект Чуй 265-а  
e-mail: [MegaCom17@mail.ru](mailto:MegaCom17@mail.ru)

**Анотация.** Изучены особенности получения биокерамических материалов на основе гидроксиапатита и d-металлов. Рассмотрено влияние легирования гидроксиапатита d-металлами на физико-механические и биомедицинские характеристики материала и его свойства.

**Ключевые слова:** биокерамика, легирование, ионное замещение, остеоинтеграция, гидроксиапатит, d-металлами.

## **HYDROXYAPATITE BIOCERAMIC MATERIALS WITH VARIOUS ADDITIONS OF d-METALS (REVIEW ARTICLE)**

Lasankhu K. A.<sup>1</sup>, Ulanbaeva A. U.

<sup>1</sup>Institute of physics named after academician J. Jeenbaev National Academy of Sciences, Bishkek, 265-a Chui Avenue, the Kyrgyz Republic  
e-mail: [MegaCom17@mail.ru](mailto:MegaCom17@mail.ru)

**Anotation.** Peculiarities of obtaining bioceramic materials based on hydroxyapatite and d-metals have been studied. Influence of hydroxyapatite doping with d-metals on physical-mechanical and biomedical characteristics of material and its properties is considered.

**Key words:** bioceramics, doping, ion substitution, osteointegration, hydroxyapatite, d-metals.

В области биомедицинского материаловедения ведутся активные исследования по созданию керамических и керамо-композиционных материалов, обладающих высокой биосовместимостью и необходимыми механическими характеристиками для применения в медицине в частности костной имплантологии. Одним из таких материалов является гидроксиапатит (ГА, химическая формула  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ), ГА является одним из основных неорганических компонентов костной ткани. Однако синтетический гидроксиапатит в чистом виде характеризуется низкой прочностью и хрупкостью, что ограничивает его использование в условиях механической нагрузки в имплантации. Для устранения этих недостатков перспективным направлением является легирование гидроксиапатита ионами переходных (d-металлов, таких как титан, цинк, алюминий, цирконий, медь, кобальт и др, так же возможно использование их оксидов. Исследования показывают, что добавление этих элементов может существенно улучшить физические, механические, химико-биологические и антимикробные свойства материала, так же расширить его использование. Получения таких биоматериалов с такой модификацией – добавления различных d-металлов и полученных биокерамокомпозиционных (БКК) получают широкое применение при производстве биокерамики, имплантатов, остеокондуктивных покрытий и костных заменителей в медицине, а так же как исходное сырье для получения других биокерамических материалов.

**Цель работы** – анализ влияния различных d-металлов на структурно-физико-механических биохимических и биомедицинские свойства БКК на основе ГА содержащих в материале, а также формулировка гипотез по улучшению характеристик биокерамики на их основе.

Исследования показывают, что добавление d-металлов (титан (Ti), серебро (Ag), цинк (Zn), магний (Mg) и стронций (Sr)) улучшает свойства гидроксиапатита (ГА) для биомедицинских применений. Кажется вероятным, что такие улучшения положительно влияют на механическую прочность, антибактериальную активность и остеогенез, но оптимальные концентрации требуют дальнейших исследований. Так же о потенциальной токсичности некоторых металлов при высоких дозах, тоже нельзя исключать, что требуется осторожного подхода и концентрации.

Гидроксиапатит – является природным веществом и входит в состав живых организмов и основой костной структуры человека, из-за этого является основным биосовместимым материалом для восстановления костей и зубов и других частей. Добавление d-металлов - Ti, Ag, Zn, Mg, Sr и др. может улучшить его механические и биологические свойства. Исследования показывают, что примерно 1% Ti повышает твердость и прочность ГА в раз-

**Серебро:** Повышает антибактериальную активность, достигая до 90% эффективности. **Цинк:** Стимулирует образование кости, увеличивая жизнеспособность клеток.

С помощью биокерамических материалов на основе гидроксиапатита с d-металлами было заменено более 40 различных частей человеческого тела – мышечную ткань, кожные покровы, кровеносные сосуды, нервные волокна, костную ткань и т.п. Биокерамика и мультizamещенный гидроксиапатит или аналогичные соединения обладают способностью вызывать регенеративную реакцию в организме. Правильный подбор биокерамических материалов является основой успеха заместительной терапии [1-3].

Исследование, опубликованное далее описывают какие свойства – механические, биомеханические, физико-химические, биологические свойства изменятся в зависимости от металла [4-9].

**Титан Ti.** В работе Innovative Bioceramic Based on Hydroxyapatite with Titanium Nanoparticles, показало, что добавление наночастиц титана к ГА улучшает его механические свойства. При содержании 1% Ti наблюдается наибольшее улучшение твердости, модуля упругости, сжимающей прочности и трещино-стойкости. Биоккомпозит имеет две гексагональные фазы: матрицу ГА и фазу Ti, с микроструктурой, аналогичной кортикальному костному веществу. Размер частиц при 0-1% Ti составляет 2,2-3,5 мкм (среднее 2,37 мкм), а при 2-3% Ti — 0,85-1,7 мкм (среднее 1,28 мкм). Электрохимически Ti-легированный ГА демонстрирует повышенную стабильность и биоактивность, с оптимальными показателями при 1% Ti, включая потенциал коррозии (E<sub>corr</sub>) около -782,71 мВ и плотность тока 0,35 нА/см<sup>2</sup> после 504 часов [2].

**Серебро (Ag).** Согласно описанной в работе Metal Ion-Doped Hydroxyapatite-Based Materials for Bone Defect Restoration, Ag-легированный ГА обладает выраженной антибактериальной активностью против различных бактерий, с показателями антибактериальной активности от 82% (0,27 ppm) до 90% (2,2 ppm) после 24 часов. Он также способствует индукции костного роста, с высвобождением BMP-2 на уровне 86% после 25 дней, и имеет низкую цитотоксичность, что делает его перспективным для восстановления костных дефектов. Высвобождение Ag<sup>+</sup> составляет 46 ppb (2,2 ppm) и 11 ppb (0,27 ppm) после 48 часов, что указывает на контролируемый уровень токсичности.

**Цинк (Zn).** Zn-легированный ГА стимулирует остеогенез и обладает антибактериальными свойствами. Клеточная жизнеспособность остается на уровне ~100% после 24 часов, а образование новой кости достигает ~20% через 6 месяцев в моделях на животных [2]. Ионы Zn усиливают экспрессию остеогенных генов, таких как Runx2, остеокальцин и активность щелочной фосфатазы (ALP), что подтверждается исследованиями, опубликованными в Metal Ion-Doped Hydroxyapatite-Based Materials for Bone Defect Restoration.

**Магний (Mg).** Mg-легированный ГА улучшает механические свойства, увеличивая модуль упругости (~100 МПа), твердость (~60 Н) и сжимающую прочность (>1,2 МПа). Он также повышает биоактивность и обладает антибактериальными свойствами, с показателями антибактериального

поведения около 60% [2]. Ионы Mg стимулируют активность остеобластов и костеобразование, что делает его подходящим для пористых имплантатов с пористостью >80%.

**Стронций (Sr).** Sr-легированный ГА усиливает остеогенез и снижает цитотоксичность. Увеличение клеточной жизнеспособности составляет 25-37% после 7 дней, а отношение ALP/MTT превышает 0,3 после 7 дней [2]. Он также может служить носителем для лекарств, с высокой эффективностью загрузки (97,21±0,75% в/в) и контролируемым высвобождением, например, скорость высвобождения тетрациклина (TC) составляет ~2,36%/день. Ионы Sr способствуют васкуляризованному костному регенерации, что подтверждено исследованиями в работе Metal Ion-Doped Hydroxyapatite-Based Materials for Bone Defect Restoration. Другие d-металлы (Sm, Ce и др.)

Легирование ГА самарием (Sm) и церием (Ce) улучшает механическую прочность, остеогенез и антибактериальные свойства. Например, Sm увеличивает прочность на изгиб, а экспрессия генов остеогенеза (ALP, OCN, COL-I, BMP) выше, чем в контрольной группе. Ce-легированный ГА снижает адгезию грамположительных бактерий, с углом контакта  $45,4 \pm 1,6^\circ$ , что указывает на гидрофильность поверхности [2].

**Биологические свойства:** Zn-, Sr- и Ce-легированные ГА стимулируют остеогенез и ангиогенез, а Ag- и Zn-легированные ГА обладают выраженными антибактериальными свойствами, с показателями до 90% для Ag.

**Химические свойства:** Легирование ГА различными d-металлами влияет на его кристаллическую структуру и поверхностные свойства, что может улучшить биоактивность и стабильность материала, например, через изменение угла контакта и скорости коррозии.

**Обсуждение и заключение:** Легирование ГА d-металлами предоставляет гибкий подход к улучшению его свойств для конкретных биомедицинских применений. Каждый металлический ион приносит уникальные преимущества в частности: Ti и Mg улучшают механическую прочность, Ag и Zn обеспечивают антибактериальную активность, а Zn, Sr, Sm и Ce способствуют остеогенезу. Выбор металла зависит от конкретных требований приложения, таких как нагрузочная способность, риск инфекции или необходимость быстрой костной интеграции. Однако существуют вызовы, такие как потенциальная токсичность некоторых металлов при высоких концентрациях (например, Ag может быть токсичным при >2,2 ppm) и необходимость оптимизации уровней легирования для баланса между преимуществами и рисками. Будущие исследования должны быть направлены на углубленное понимание механизмов действия этих добавок, разработку стандартизированных методов их введения в ГА и оценку долгосрочной биосовместимости в клинических условиях.

Введение d-металлов в биокерамические материалы на основе гидроксиапатита значительно улучшает их пригодность для восстановления костных дефектов. Выбор и оптимизация типа и концентрации металлических ионов позволяют создавать передовые биокерамики, отвечающие разнообразным потребностям ортопедии и стоматологии. Продолжение

исследований в этой области обещает разработку еще более эффективных и универсальных материалов для регенеративной медицины, с акцентом на безопасность и эффективность в долгосрочной перспективе. Биокерамические материалы на основе ГА в БКК являются материал будущего.

#### Список литературы.

1. Зеличенко Е. А. Разработка защитных биосовместимых керамических и полимерных покрытий на поверхности титана: Дис. На соиск. Уч. Ст. кандидата тех. Наук. – Северск, 2011 материалы
2. Dafne R. P.-H., Héctor H.-H. Innovative Bioceramic Based on Hydroxyapatite with Titanium Nanoparticles as Reinforcement for Possible Medical Applications// *Journal Manufacturing and materials processing*. Т.8., V6. - <https://www.mdpi.com/2504-4494/8/6/296#>
3. Ласанху К. А., Касмамытов Н. К. Биокерамические материалы в современное время// Бишкек: научный журнал «Физика». - 2023. -№1. –С. 7-10.
4. Radulescu D.-E., Vlad-Oros N., Albu M., Agathopoulos S. Latest Research of Doped Hydroxyapatite for Bone Tissue Engineering. *Int. J. Mol. Sci.* 2023, 24(17), 13157. doi:10.3390/ijms241713157.
5. Li X., Yao C., Shen J., Zhu S., Kong Y., Yao C., Zhou Y., Xia J. The Impact of Titanium Hydroxyapatite Doping on the Mechanical and Biological Properties of Photocured Resin. *Micromachines* 2024, 15(8), 1040. doi:10.3390/mi15081040.
6. Guerra-López J.R., Bianchi A.E., Ramos M.A. et al. Preparation of Zinc-Doped Hydroxyapatite Ceramics and Evaluation of Biocompatibility and Antibacterial Activity. *J. Funct. Biomater.* 2025, 16(3), 88. doi:10.3390/jfb1603008
7. An S.-H., Matsumoto T., Miyajima H., Nakahira A., Kim K.-H., Imazato S. Porous Zirconia/Hydroxyapatite Scaffolds for Bone Reconstruction. *Dent. Mater.* 2012, 28(12), 1221–1231. doi:10.1016/j.dental.2012.09.001.
8. Mansour S.F., El-Dek S.I., Ahmed M.K., Abd-Elwahab S.M., Ahmed M.K. Physico-mechanical and Morphological Features of Zirconia-Substituted Hydroxyapatite Nanocrystals. *Sci. Rep.* 2017, 7, 43202. doi:10.1038/srep43202.
9. Noori A., Hoseinpour M., Kolivand S., Lotfibakhshaiesh N., Ebrahimi-Barough S., Ai J. Exploring the Various Effects of Cu Doping in Hydroxyapatite Nanoparticles. *Sci. Rep.* 2024, 14, 3421. doi:10.1038/s41598-024-53704-x.
10. Safari-Gezaz M., Parhizkar M., Asghari E. Effect of Cobalt Ions Doping on Morphology and Electrochemical Properties of Hydroxyapatite Coatings for Biomedical Applications. *Sci. Rep.* 2025, 15, 149. doi:10.1038/s41598-024-84055-2.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Гуринович А., Ниязбеков И.Т.</b>	Обзор методов очистки воды спортивно-оздоровительных бассейнов г.Бишкек	3
<b>Гуринович А., Ниязбеков И.Т.</b>	Анализ химического состава воды на содержание кислотности рН в спортивно-оздоровительном бассейне	7
<b>Мамыров У.И., Кидибаев М.М.</b>	Выявление абсолютного пространства и абсолютной скорости материальных объектов	11
<b>Орозобаков А.Т., Саякбаева Б. Б., Орозобаков Ж.А.</b>	Сезонные вариации содержания озона над районами наземных микроволновых измерений	17
<b>Хайдаров Б. К., Арыков А. К., Хайдаров К.</b>	Металлокерамическая связка камнерезного алмазного инструмента, изготавливаемого под высоким давлением	23
<b>Ганыева А. С.</b>	Люминесценция кристаллов $\text{LiNaSO}_4$ и $\text{LiKSO}_4$ активированные ионами хрома	31
<b>Касмамытов Н. К., Куйкеев А. Б.</b>	Физико-химические принципы получения огнеупоров из местного сырья Кыргызской Республики (Обзор)	35
<b>Акимжанова Ч.С., Сагымбаев А.А.</b>	Голография цифровой трансформации: роль в 6G сетях, цифровых двойниках и умных системах	41
<b>Акимжанова Ч.С., Сагымбаев А.А.</b>	Голографические запоминающие устройства страничной архитектуры: ограничения, методы нейтрализации и будущее информационных технологий	53
<b>Акимжанова Ч.С., Сагымбаев А.А.</b>	Архитектурные решение и роль пространственно-временной модуляции в объёмных системах голографической памяти	62
<b>Ласанху К. А., Уланбаева А. У.</b>	Биокерамические материалы на основе гидросиапатита с различными добавлениями d-металлов	71

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

## Документы

- Сопроводительное письмо на имя главного редактора журнала печатается на бланке учреждения, представляющего статью;
- Рецензия.

## Составные части статьи и порядок их следования

1. Объем материала от 4 до 10 страниц набранного текста оформленного в текстовом редакторе Microsoft Word, файл в формате .doc или .docx (шрифт 14, Times New Roman, интервал 1). Поля: верхнее, нижнее-20мм, левое-2,5мм, правое-15мм. Графический материал должен быть четким, разрешение не менее 300 пикселей;
2. В верхнем левом углу указывается универсальная десятичная классификация (УДК);
3. Следующий абзац – название статьи указывается по центру (шрифт 14 полужирный **ЗАГЛАВНЫМИ БУКВАМИ**);
4. Во втором ряду фамилия имя отчество автора(ов);
5. В третьем ряду указывается полное название учебного заведения (место работы или учебы), город и страна;
6. Дальше через строку (шрифт 12, Times New Roman, интервал 1):
  - Аннотация не менее 50 слов на языке статьи (на русском и английском языках);
  - *Ключевые слова от 3 до 5 слов и словосочетаний, курсив* (на русском и английском языках);
7. Дальше через строку идет изложение материала (шрифт 14, Times New Roman):
  - **Введение** (состояние проблемы, задачи исследования);
  - **Основная часть** – название в текст не вносится. Основную часть рекомендуется разбивать на разделы с названиями, отражающими их содержание: постановка задачи, методы исследования, математическая модель, обсуждение результатов и т.д.;
  - **Заключение** (выводы).
8. После основного текста указывается список литературы (Список использованной литературы). Список литературы оформляется не по алфавиту, а по мере того, как она встречается в тексте статьи. Схема списка литературы:  
**Авторы** (обычный шрифт) → **название статьи** (обычный шрифт) → **выходные данные** (город, издательство) → **цифровые данные** (год, страницы). (Острейковский В. А., Карманов Ф. И. Статистические методы обработки экспериментальных данных с использованием пакета MathCAD. М.: ИНФРА-М, 2015. 207 с.);
9. Рисунки и таблицы набираются шрифтом Times New Roman 12 с одинарным междустрочным интервалом. Рисунки, диаграммы и таблицы создаются с использованием черно-белой гаммы. Использование цвета и заливок не допускается! Все рисунки и таблицы должны иметь название:
  - Рис. 1. Название (точка), выравнивание по центру;
  - Таблица 1 – Название (точка в конце не ставится) выравнивание по левому краю;
10. Формулы следует набирать с помощью редактора формул Microsoft Equation и нумеровать в круглых скобках (2).
11. Отдельным файлом подаются сведения об авторе:
  - контактный телефон, Viber, WhatsApp, Telegram, Mail.Ru Агент и т. п.;
  - Электронная почта e-mail – @mail.ru, gmail.com, @yandex.ru и т. п.;
12. Авторы и рецензенты несут полную ответственность за актуальность, содержание, стиль и качество оформление статьи, а так же за ее актуальность.

Басууга 27.06.2024-ж. кол коюлду.

№30 офсет кагазы.

Форматы 84x60 1/16

Көлөмү 7,5 б.т.

Нускасы 50. Заказ 2024.

«Avrasya Press» басмаканасы

Бишкек ш., 7-апрель көч. №1а. Тел: 0(312)299 300

E-mail: [avrasyapress2003@mail.ru](mailto:avrasyapress2003@mail.ru)

[www.avrasyapress.com](http://www.avrasyapress.com)

