

ISSN 2709-6238



ВЕСТНИК

ФИЛИАЛА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
В ГОРОДЕ ДУШАНБЕ

СЕРИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

ПАЁМИ

ФИЛИАЛИ ДОНИШГОҶИ ДАВЛАТИИ МОСКВА
БА НОМИ М.В. ЛОМОНОСОВ
ДАР ШАҲРИ ДУШАНБЕ

БАХШИ ИЛМҶОИ ТАБИЙ ВА ЗАМИНШИНОСӢ

BULLETIN

OF LOMONOSOV MOSCOW STATE
UNIVERSITY IN DUSHANBE

NATURAL AND GEOLOGICAL SCIENCES SERIES

Том 1, № 3(57) 2026

ISSN 2709-6238

В Е С Т Н И К

ФИЛИАЛА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
В ГОРОДЕ ДУШАНБЕ

СЕРИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

П А Ё М И

ФИЛИАЛИ ДОНИШГОҶИ ДАВЛАТИИ МОСКВА
БА НОМИ М.В. ЛОМОНОСОВ ДАР ШАҲРИ ДУШАНБЕ

БАҲШИ ИЛМҶОИ ТАБИЙ ВА ЗАМИНШИНОСӢ

B U L L E T I N

OF LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY
IN DUSHANBE

NATURAL AND GEOLOGICAL SCIENCES SERIES

Том 1, № 3(57) 2026

**ФИЛИАЛ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА В ГОРОДЕ ДУШАНБЕ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 2016 ГОДУ**

**ФИЛИАЛИ ДОНИШГОҲИ ДАВЛАТИИ МОСКВА
БА НОМИ М.В. ЛОМОНОСОВ ДАР ШАҲРИ ДУШАНБЕ
МАҶАЛЛАИ ИЛМӢ СОЛИ 2016 ТАЪСИС ЁФТААСТ**

**LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY IN DUSHANBE
ACADEMIC JOURNAL FOUNDED IN 2016**

Редакционный совет:

Садовничий Виктор Антонович – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН; Трофимов Сергей Викторович – кандидат социологических наук, доцент; Файзализода Бахрулло Файзали – доктор педагогических наук, профессор; Илолов Мамадшо – доктор физико-математических наук, профессор, академик НАНТ, Диноршоҳ Азиз Мусо – доктор юридических наук, профессор.

Журнал включён в список рецензируемых журналов
ВАК при Президенте Республики Таджикистан, РИНЦ (Elibrary.ru)

Редакционная коллегия:

Главный редактор: Файзализода Бахрулло Файзали – доктор педагогических наук, профессор

Заместитель главного редактора: Умарова Татьяна Мухсиновна – доктор технических наук, доцент

Члены редколлегии:

Чубариков Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор

Ерёмин Николай Николаевич – доктор химических наук, член-корреспондент РАН

Кнотько Александр Валерьевич – доктор химических наук, профессор

Пушаровский Дмитрий Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор

Фарход Рахими – доктор физико – математических наук, профессор, академик НАНТ

Илолов Мамадшо – доктор физико-математических наук, профессор, академик НАНТ

Шабозов Мирганд Шабозович – доктор физико-математических наук, профессор

Рахмонов Зарулло Хусейнович – доктор физико-математических наук, профессор

Халиков Джурабой Халикович – доктор химических наук, профессор, академик НАНТ

Саидов Мирзо Сухбатуллоевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор

Умарова Татьяна Мухсиновна – доктор технических наук, доцент

Салихов Фарид Салохиддинович – доктор геолого-минералогических наук, доцент

Реймерс Алексей Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Демидович Павел Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент

Казиджанова Нодира Марифатовна – кандидат технических наук, доцент

Одинабеков Джасур Музофирович – кандидат физико-математических наук, доцент

Широков Владимир Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент

*В журнале статьи печатаются на русском, таджикском и английском языках.
Дар маҷалла мақолаҳо бо забонҳои русӣ, тоҷикӣ ва англисӣ нашр мешаванд.*

СОДЕРЖАНИЕ - МУНДАРИЧА

МАТЕМАТИКА

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ОДНОЙ СИСТЕМЫ ДВУХ ОПЕРАТОРНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
УРАВНЕНИЙ ОПЕРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Зарифзода С.К., Хасанов Б.К. 5

ТАҲЛИЛИ МОДЕЛҲОИ МАТЕМАТИКИИ СИСТЕМАҲОИ ХИЗМАТРАСОНИИ ОММАВЌ
ДАР МАСИРГУЗОРИИ ЭКОСИСТЕМАҲОИ РАҶАМИИ ТАҚСИМШУДА

Ёров М.Р. 20

АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ БУДУЩИХ
СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Зиёмидинов Б.М., Туев Ш.Ш...... 45

ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ ЛУЧИСТОМ ОБОГРЕВЕ ПЛАСТИНЫ

Казиджанова Н.М...... 58

ХИМИЯ

ВЛИЯНИЕ БАРИЯ НА ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ СПЛАВА
АК10Ц10

Абдулхамиди Джама..... 66

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОАГУЛЯЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СМЕСИ
АЛЮМО-ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ КОАГУЛЯНТОВ

Аслонзода А.А., Наимов Н.А., Рафиев Р.С., Ахмадшоев И.Ш. 78

ВЛИЯНИЕ НАТРИЯ НА ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ СПЛАВА
ZnAl1Ni0.5 В ТВЁРДОМ СОСТОЯНИИ

Ганиев И.Н., Алиева Л.З., Муродализода У.М., Саидзода М.М...... 91

КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОХИМИИ ГОРНЫХ РЕК И СТЕПЕНИ
ИХ ПРИМЕНИМОСТИ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ

Норматов И.Ш., Ходжизода А.Э., Шарофзода Ф.А...... 109

МОДЕЛРОНИИ РАВАНДИ ИШҚОРОНИИ КОНСЕНТРАТИ СУРМАДОРИ КОНИ КОНЧОЧ
Самихзода Ш.Р., Шамсиддинов А.И., Шерзода Н., Jiang Xiaohong..... 123

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЁМКОСТИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
ФУНКЦИИ СПЛАВА Zn1Al0.5Ni, ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

Улфатов С.Э., Ганиев И.Н., Амонова А.В., Саидзода М.М...... 137

ГЕОЛОГИЯ

ЭРОЗИОННЫЕ ФЛЮВИАЛЬНЫЕ МИКРО-И МЕЗОФОРМЫ В СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ
ЮЖНОГО ГИССАРА

Салихов Ф.С., Саидов М.С., Махдизода М.М. 159

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРАКТИКИ РАННИХ КУРСОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ СТАНОВЛЕНИЕ ГЕОЛОГОВ

Спиридонов А.В., Салихов Ф.С. 170

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УЧАСТКОВ
МИНЕРАЛИЗАЦИИ ЮЖНОГО ГИССАРА НА ОСНОВЕ ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Файзиев Ф.А., Каюмарси М...... 180

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОСЫПЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТАДЖИКИСТАНА Файзуллоев Ш.А.....	196
ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОНОСНЫХ УГЛЕЙ КАМЕННОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФАН-ЯГНОБ Фозилов Д.Н., Саидов М.С.	209
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	226

УДК 517.926; 517.444

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ОДНОЙ СИСТЕМЫ ДВУХ ОПЕРАТОРНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ОПЕРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**Зарифзода С.К.¹, Хасанов Б.К.²***Таджикский национальный университет¹**Бохтарский государственный университет имени Носира Хусрава²*

Аннотация. В статье исследуется система двух неоднородных операторно-дифференциальных уравнений с использованием аппарата операционного исчисления. Авторами предложен и детально обоснован метод построения решений указанной системы, основанный на свойствах операторной свёртки. В работе подробно рассмотрены три возможных случая для корней характеристического уравнения системы: вещественные и различные корни, двукратные (равные) вещественные корни, а также комплексно-сопряженные корни. Для каждого из этих случаев доказаны соответствующие теоремы существования и единственности, а также получены явные аналитические формулы для общих решений в виде интегральных представлений функций-оригиналов через заданные граничные условия и правые части. Полученные результаты могут быть применены при моделировании динамических процессов в теоретической физике и прикладной математике.

Ключевые слова: операторно-дифференциальные уравнения, операционный метод, характеристическое уравнение, интегральное представление, функции-оригиналы, теорема о свёртке, комплексно-сопряженные корни.

Введение

В современной математике и её приложениях важное место занимают дифференциальные уравнения, которые возникают при моделировании различных процессов в физике, механике и теории управления. Особый интерес представляет исследование систем таких уравнений, поскольку они позволяют более адекватно описывать сложные взаимосвязанные явления.

Исследованию систем обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, в частности систем второго порядка, а также качественному анализу их решений посвящено значительное число научных работ [1 - 6].

В последние десятилетия наблюдается рост интереса к изучению систем дифференциальных уравнений с особыми коэффициентами.

Например, в нашей республике в работах академика Н. Раджабова и его учеников изучаются системы двух дифференциальных уравнений с одной особой точкой, а также системы из n дифференциальных уравнений, имеющих одну особую точку [7].

Также значительное внимание в современной литературе уделяется исследованию систем переопределенных дифференциальных уравнений. Например, в работах Н. Раджабова [8] и Ф. Шамсудинова [9] были исследованы различные классы переопределенных систем дифференциальных уравнений, обладающих различными типами особенностей.

Дифференциальные уравнения с двумя и тремя особыми точками были исследованы в работах [10 – 12]. Аналогичная теория для некоторых классов интегро-дифференциальных уравнений с различными видами сингулярностей разработана в работах [13 – 20].

Основы операционного метода исследования подобных классов уравнений были заложены в работах [21, 22].

Постановка и исследование задачи. Пусть $\Gamma = \{x: 0 < x < 1\}$ – множество точек на вещественной оси. Интервал Γ с помощью точки x разбивается на два интервала $\Gamma_1(0, x)$ и $\tilde{\Gamma}_1(x, 1)$. Интервалы Γ_1 и $\tilde{\Gamma}_1$ будем называть сопряжёнными интервалами. На Γ_1 рассмотрим следующую систему двух операторно-дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} D_x^{11}y = a_{11}y + a_{12}z + f(x), \\ D_x^{11}z = a_{21}y + a_{22}z + g(x), \end{cases} \quad (1)$$

где $D_x^{11} = x(1-x) \frac{d}{dx}$ – двухточечный дифференциальный оператор, $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ – постоянные коэффициенты, $f(x)$ и $g(x)$ – заданные непрерывные функции на Γ_1 .

Неоднородной системе (1) соответствует следующая однородная система уравнений:

$$\begin{cases} D_x^{11}y = a_{11}y + a_{12}z, \\ D_x^{11}z = a_{21}y + a_{22}z. \end{cases} \quad (2)$$

Систему дифференциальных уравнений (1) будем исследовать с использованием метода интегральных преобразований. В математике существуют очень разнообразные виды интегральных преобразований. Например, интегральное преобразование Лапласа, интегральное преобразование Меллина, интегральное преобразование Фурье и т.д. Одно из таких интегральных преобразований называется S_{11} – интегральным преобразованием. Заметим, что основы S_{11} -интегрального преобразования были заложены в докторской диссертации С.К. Зарифзода.

Приведём основные определения и свойства данного интегрального преобразования.

Определение 1. Правосторонним S_{11} – интегральным преобразованием функции действительного переменного $f(x)$ называется функция комплексного переменного $F^+(p)$, определяемая формулой:

$$F^+(p) = S_{11}^+[f(x)](p) = \int_{\frac{1}{2}}^1 \left(\frac{x}{1-x}\right)^{-p} f(x) \frac{dx}{x(1-x)}, \quad (3)$$

где в этом интеграле функция $f(x)$ удовлетворяет условию:

$$|f(x)| \leq \begin{cases} c_1 \left(\frac{x}{1-x}\right)^\alpha, & \text{если } x \in \left(\frac{1}{2}, 1\right), \\ 0, & \text{если } x \notin \left(\frac{1}{2}, 1\right), \end{cases} \quad (4)$$

$\operatorname{Re} p > \alpha$.

Для данного интегрального преобразования можно построить аналоги всех теорем операционного исчисления. Однако здесь приводятся основные свойства правостороннего S_{11}^+ -интегрального преобразования, которые будут необходимы нам в дальнейшем исследовании.

1⁰. Если $S_{11}^+\{f(x)\} = F^+(p)$ и $D_x^{11}f(x)$ удовлетворяет условию (4) (т.е. является функцией-оригиналом), то:

$$S_{11}^+\{D_x^{11}f(x)\} = pF^+(p) - f\left(\frac{1}{2}\right), \operatorname{Re} p = \gamma > \alpha,$$

где α – показатель роста функции $f(x)$ на интервале $\left(\frac{1}{2}, 1\right)$.

$$2^0. S_{11}^+\left\{\left(\frac{x}{1-x}\right)^\alpha\right\} = \frac{1}{p-\alpha}, \text{ при } \operatorname{Re} p > \alpha,$$

$$S_{11}^+\left\{\left(\frac{x}{1-x}\right)^{-\alpha}\right\} = \frac{1}{p+\alpha}, \text{ при } \operatorname{Re} p > -\alpha.$$

$$3^0. S_{11}^+\left\{\left(\frac{x}{1-x}\right)^\alpha \ln^n \frac{x}{1-x}\right\} = \frac{n!}{(p-\alpha)^{n+1}}, \text{ при } \operatorname{Re} p > \alpha.$$

$$4^0. S_{11}^+\left\{\left(\frac{x}{1-x}\right)^\alpha \sin\left[\beta \ln\left(\frac{x}{1-x}\right)\right]\right\} = \frac{\beta}{(p-\alpha)^2 + \beta^2}, \text{ при } \operatorname{Re} p > \alpha,$$

$$S_{11}^+\left\{\left(\frac{x}{1-x}\right)^\alpha \cos\left[\beta \ln\left(\frac{x}{1-x}\right)\right]\right\} = \frac{p-\alpha}{(p-\alpha)^2 + \beta^2}, \text{ при } \operatorname{Re} p > \alpha.$$

5⁰. **Теорема о сложной свёртке.** Если $f_1^*\left(\frac{x}{1-x}\right) \doteq F_1^+(p)$ и $f_2^*\left(\frac{x}{1-x}\right) \doteq F_2^+(p)$, тогда:

$$h^+\left(\frac{x}{1-x}\right) = \int_{1/2}^x f_1^*\left(\frac{t}{1-t}\right) f_2^*\left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right) \frac{dt}{t(1-t)} \doteq F_1^+(p) \cdot F_2^+(p),$$

где $\operatorname{Re} p = \gamma > \max\{\alpha_0^1, \alpha_0^2\}$.

Поскольку система операторно-дифференциальных уравнений (1) исследуется операционным методом с использованием S_{11}^+ -интегрального преобразования, необходимо также выполнение начальных условий. Поэтому постановка задачи имеет следующий вид:

Постановка начальной задачи. Требуется найти такое решение системы операторно-дифференциальных уравнений (1), которое удовлетворяет заданным начальным условиям:

$$y\left(\frac{1}{2}\right) = 0, z\left(\frac{1}{2}\right) = 0. \quad (5)$$

Исследование задачи. Пусть в системе уравнений (1) каждое из слагаемых, а также функции $f(x)$ и $g(x)$ являются функциями-оригиналами в смысле S_{11}^+ -интегрального преобразования. Тогда, применяя это интегральное преобразование к обеим частям уравнений системы (1), получаем:

$$\begin{cases} S_{11}^+\{D_x^{11}y\} = S_{11}^+\{a_{11}y + a_{12}z + f(x)\}, \\ S_{11}^+\{D_x^{11}z\} = S_{11}^+\{a_{21}y + a_{22}z + g(x)\}. \end{cases}$$

С учётом условий (5) получаем:

$$\begin{cases} pY(p) = a_{11}Y(p) + a_{12}Z(p) + F(p), \\ pZ(p) = a_{21}Y(p) + a_{22}Z(p) + G(p), \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} (p - a_{11})Y(p) - a_{12}Z(p) = F(p), \\ -a_{21}Y(p) + (p - a_{22})Z(p) = G(p). \end{cases} \quad (6)$$

Пусть определитель системы (6):

$$\Delta = \begin{vmatrix} p - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & p - a_{22} \end{vmatrix} = p^2 - (a_{11} + a_{22})p + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0.$$

Тогда система (6) однозначно разрешима, и её решение можно найти с помощью метода Крамера:

$$\begin{aligned} \Delta_y &= \begin{vmatrix} F(p) & -a_{12} \\ G(p) & p - a_{22} \end{vmatrix} = (p - a_{22})F(p) + a_{12}G(p), \\ \Delta_z &= \begin{vmatrix} p - a_{11} & F(p) \\ -a_{21} & G(p) \end{vmatrix} = a_{21}F(p) + (p - a_{11})G(p), \\ Y(p) &= \frac{(p - a_{22})F(p) + a_{12}G(p)}{\Delta}, Z(p) = \frac{a_{21}F(p) + (p - a_{11})G(p)}{\Delta}. \end{aligned} \quad (7)$$

В дальнейшем алгебраическое уравнение

$$p^2 - (a_{11} + a_{22})p + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0 \quad (8)$$

будем называть характеристическим уравнением системы (1). В зависимости от корней характеристического уравнения (8) о разрешимости системы (1) получим следующие утверждения:

Теорема 1. Пусть в системе неоднородных операторно-дифференциальных уравнений (1) коэффициенты $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ таковы, что корни

характеристического уравнения (8) являются вещественными и различными. Пусть функции $f(x)$ и $g(x)$ непрерывны на интервале Γ_1 . Тогда задача (1)–(5) однозначно разрешима, и её единственное решение задаётся формулой:

$$\begin{cases} y(x) = \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\frac{a_{22} - p_1}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} - \frac{a_{22} - p_2}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_2} \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} - \\ - \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\frac{a_{12}}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} - \frac{a_{12}}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_2} \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}, \\ z(x) = - \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\frac{a_{21}}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} - \frac{a_{21}}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_2} \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ + \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\frac{a_{11} - p_1}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} - \frac{a_{11} - p_2}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_2} \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}. \end{cases} \quad (9)$$

Схема доказательства. Запишем равенства (7) в форме, удобной для применения теоремы о сложной свёртке (свойство 5⁰), и, используя эту теорему, восстановим функции-оригиналы для правых частей равенства (7) в виде (9), что даёт единственное решение задачи (1)–(5).

Далее, легко можно показать, что общее решение однородной системы (2) представляется системой двух функций:

$$\begin{cases} y(x) = C_1 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_1} + C_2 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_2}, \\ z(x) = C_1 \frac{p_1 - a_{11}}{a_{12}} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_1} + C_2 \frac{p_2 - a_{11}}{a_{12}} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_2}. \end{cases} \quad (10)$$

и отсюда общее решение системы (1) получается путем прибавления общего решения однородной системы (2) к частному решению неоднородной системы (1) и имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = C_1 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_1} + C_2 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_2} + \\ + \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\frac{a_{22} - p_1}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} - \frac{a_{22} - p_2}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_2} \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} - \\ - \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\frac{a_{12}}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} - \frac{a_{12}}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_2} \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}, \\ z(x) = C_1 \frac{p_1 - a_{11}}{a_{12}} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_1} + C_2 \frac{p_2 - a_{11}}{a_{12}} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_2} - \\ - \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\frac{a_{21}}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} - \frac{a_{21}}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_2} \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ + \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\frac{a_{11} - p_2}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} - \frac{a_{11} - p_2}{p_2 - p_1} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_2} \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}. \end{array} \right.$$

II. Пусть p_1 является двухкратным корнем характеристического уравнения (8). В этом случае имеет место следующая теорема:

Теорема 2. Пусть в системе неоднородных операторно-дифференциальных уравнений (1) коэффициенты $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ таковы, что корни характеристического уравнения (8) являются вещественными и равными. Пусть функции $f(x)$ и $g(x)$ непрерывны на интервале Γ_1 . Тогда задача (1) – (5) однозначно разрешима, и её единственное решение задаётся формулой:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} + \right. \\ \left. + (p_1 - a_{22}) \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ \left. + \int_{\frac{1}{2}}^x a_{12} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) g(t) \frac{dt}{t(1-t)}, \right. \\ z(x) = \int_{\frac{1}{2}}^x a_{21} \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ \left. + \int_{\frac{1}{2}}^x \left[\left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} + \right. \right. \\ \left. \left. + (p_1 - a_{12}) \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{p_1} \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}. \right. \end{array} \right. \quad (11)$$

В этом случае общее решение однородной системы (2) определяется системой двух функций:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_1} [C_1 + C_2 \ln \left(\frac{x}{1-x} \right)], \\ z(x) = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{p_1} \left[\frac{(p_1 - a_{11})C_1 + C_2}{a_{12}} + \frac{(p_1 - a_{11})C_2}{a_{12}} \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right], \end{array} \right. \quad (12)$$

а общее решение неоднородной системы (1) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = \left(\frac{x}{1-x}\right)^{p_1} [C_1 + C_2 \ln\left(\frac{x}{1-x}\right)] + \\ + \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right)^{p_1} \left[1 + (p_1 - a_{22}) \ln\left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right)\right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ + a_{12} \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right)^{p_1} \ln\left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right) g(t) \frac{dt}{t(1-t)}, \\ z(x) = \left(\frac{x}{1-x}\right)^{p_1} \left[\frac{(p_1 - a_{11})C_1 + C_2}{a_{12}} + \frac{(p_1 - a_{11})C_2}{a_{12}} \ln\left(\frac{x}{1-x}\right)\right] + \\ + a_{21} \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right)^{p_1} \ln\left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right) f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ + \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right)^{p_1} \left[1 + (p_1 - a_{11}) \ln\left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t}\right)\right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}. \end{array} \right.$$

III. Пусть корни характеристического уравнения (8) являются комплексно-сопряженными и обозначаются следующим образом:

$$p_{1,2} = \alpha \pm i\beta.$$

Тогда в этом случае о разрешимости задачи (1)-(5) имеет место следующая теорема:

Теорема 3. Пусть корни характеристического уравнения (8) являются комплексно-сопряженными. Кроме того, пусть функции $f(x)$ и $g(x)$ непрерывны на интервале Γ_1 . Тогда задача (1)-(5) однозначно разрешима, и её единственное решение задаётся формулой

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{\alpha} \left[\cos \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] + \right. \\ \quad \left. + \frac{\alpha - a_{22}}{\beta} \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ \quad + \frac{a_{12}}{\beta} \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{\alpha} \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}, \\ z(x) = \frac{a_{21}}{\beta} \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{\alpha} \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ \quad + \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^{\alpha} \left[\cos \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] + \right. \\ \quad \left. + \frac{\alpha - a_{11}}{\beta} \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}. \end{array} \right.$$

В случае комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения

(8) общее решение однородной системы (2) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{\alpha} \left[C_1 \cos \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] + C_2 \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] \right], \\ z(x) = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{\alpha} \left[\frac{(\alpha - a_{11})C_1 + \beta C_2}{a_{12}} \cos \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] + \right. \\ \quad \left. + \frac{(\alpha - a_{11})C_2 - \beta C_1}{a_{12}} \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] \right], \end{array} \right.$$

а общее решение неоднородной системы (1) примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} y(x) &= \left(\frac{x}{1-x}\right)^\alpha \left[C_1 \cos \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] + C_2 \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] \right] + \\ &+ \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^\alpha \left[\cos \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{\alpha - a_{22}}{\beta} \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ &+ \frac{a_{12}}{\beta} \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^\alpha \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}, \\ z(x) &= \left(\frac{x}{1-x}\right)^\alpha \left[\frac{(\alpha - a_{11})C_1 + \beta C_2}{a_{12}} \cos \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{(\alpha - a_{11})C_2 - \beta C_1}{a_{12}} \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] \right] + \\ &+ \frac{a_{21}}{\beta} \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^\alpha \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] f(t) \frac{dt}{t(1-t)} + \\ &+ \int_{\frac{1}{2}}^x \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right)^\alpha \left[\cos \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{\alpha - a_{11}}{\beta} \sin \left[\beta \ln \left(\frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-t}{t} \right) \right] \right] g(t) \frac{dt}{t(1-t)}. \end{aligned} \right.$$

Литература

1. Матвеев Н.М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений / Н.М. Матвеев. – М.: Высш. шк., 1962. – 366 с.
2. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений / В.В. Степанов. – М.: Физматгиз, 1959. – 468 с.
3. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1969. – 424 с.
4. Альмухамедов М.М. Качественное исследование одной системы дифференциальных уравнений // Учён. зап. изд. ун-та. – 1954. – Т. 14, книга 8. – С. 9-20.
5. Кушков Н.Н. Качественное исследование одной системы двух дифференциальных уравнений // УНК. – 1958. – Т. 13. – Вып. 3. – С. 195-202.

6. Мухамадиев Э.М. Предельные циклы кусочно-линейных дифференциальных уравнений второго порядка / Э.М. Мухамадиев, И.Д. Нурув, М.Ш. Халилова // Уфимский математический журнал. – 2014. – Т.6. – Вып. 1. – С. 84-93.
7. Раджабов Н. Система двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с n сингулярной точкой // Материалы международной конференции «Дифференциальные уравнения с сингулярными коэффициентами». – Душанбе, 1996. – С. 89.
8. Раджабов Н. Переопределённая линейная система второго порядка с сингулярными и сверх - сингулярными линиями / Н. Раджабов, Мохаммед Эльсаед Абдел Аал // LAP LAMBERT Academic Publishing. – Germany, – 234 с.
9. Шамсудинов Ф.М. Об одной переопределённой системе дифференциальных уравнений второго порядка с сингулярной точкой / Ф.М. Шамсудинов // Тр. матем. центра им. Н.И. Лобачевского. – Казань: из-во Казан. матем. общ-ва. – 2014. – Т. 49. – С. 335-339.
10. Раджабов Н. Линейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с двумя граничными сингулярными точками / Н. Раджабов, С. Зарипов // Вестник Терского национального университета. – 2008. – № 4 (9). – С. 32-46.
11. Раджабов Н. Решение немодельного линейного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с двумя граничными сингулярными точками / Н. Раджабов, С. Зарипов // Вестник Терского национального университета. – 2009. – № 1 (14) – С. 3-14.
12. Зарипова С.К. Получение явных решений дифференциального уравнения Римана второго порядка с тремя особыми точками / Зарипов С.К. // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2021. – №5. – С. 116-121.
13. Зарипов С.К. Об одном классе модельных интегро-дифференциальных уравнений первого порядка со сверхсингулярной точкой в ядре / С.К. Зарипов

- // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2015. – №1-6. – С. 6.
14. Зарипов С.К. Об одном классе модельного интегро-дифференциального уравнения первого порядка с одной сингулярной точкой в ядре. / С.К. Зарипов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2015. – №1-3. – С. 27-32.
15. Зарипов С.К. Об одном классе модельного интегро-дифференциального уравнения первого порядка с одной сингулярной точкой в ядре / С.К. Зарипов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2017. – №1-3. – С. 34-37.
16. Зарипов С.К. Решения одного класса модельных интегро-дифференциальных уравнений первого порядка с сингулярным ядром / С.К. Зарипов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2017. – №1-3. – С. 34-37.
17. Зарипов С.К. Решения одного класса модельных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка с сингулярным ядром / С.К. Зарипов, Н. Раджабов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2017. – Т. 60. – №3-4. – С. 118-123.
18. Zaripova S.K. On a New Class of Singular Integro-Differential Equations / T.K. Yuldashov, S.K. Zaripova // Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. – 2021. – №1(101). – P. 138-145.
19. Зарипова С.К., Тадқиқи як сифати муодилаҳои интегро-дифференциалӣ ба нуктаи рости барзиёд-сингулярӣ / Зарипова С.К., Искандари Қ. // Паёми донишгоҳи миллии Тоҷикистон. Бахши илмҳои табиӣ. – 2021. – №1. – С. 5-19.
20. Zaripova S.K. Volterra-Type Integro-Differential Equations with Two-Point Singular Differential Operator / S.K. Zaripova, T.K. Yuldashov, I. Dzhamkhon // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2021. Т. 42. №15. – P. 3784-3792.

21. Зарипов С.К. S-интегральное преобразование и его основные свойства / Зарипов С.К. // Вестник Таджикского национального университета. – 2019. – № 1. – С. 50.
22. Зарипов С.К. S-интегральное преобразование и его приложения для решения сингулярных интегро-дифференциальных уравнений / Зарипов С.К. // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2019. – № 2. – С. 100.

ДАР БОРАИ ТАДҚИҚИ СИСТЕМАИ ДУ МУОДИЛАИ ОПЕРАТОРӢ-ДИФФЕРЕНЦИАЛӢ БО ИСТИФОДАИ УСУЛИ ОПЕРАТСИОНӢ

Зарифзода С.Қ.¹, Ҳасанов Б.Қ.²

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

Донишгоҳи давлатии Бохтар ба номи Носири Хусрав

Аннотатсия. Дар мақола системаи ду муодилаи операторӣ-дифференсиалии ғайриҷамъинса бо истифода аз методи ҳисоби оператсионӣ мавриди тадқиқ қарор гирифтааст. Аз ҷониби муаллифон усули сохтани ҳалҳои системаи мазкур, ки ба ҳосиятҳои печии операторӣ (свёртка) асос ёфтааст, пешниҳод ва ба таври муфассал асоснок карда шудааст. Дар қор се ҳолати имконпазири решаҳои муодилаи хarakterистикӣ система: решаҳои ҳақиқӣ ва ғуногун, решаҳои ҳақиқӣ дукарата (баробар), инчунин решаҳои комплекси ҷамбаста (комплексно-сопряженные) ба таври муфассал баррасӣ шудаанд. Барои ҳар як аз ин ҳолатҳо теоремаҳои мувофиқи мавҷудият ва ягонагӣ исбот карда шуда, инчунин формулаҳои аниқӣ аналитикӣ барои ҳалҳои умумӣ дар намуди пешниҳодҳои интегралӣ функсияҳои оригиналӣ тавассути шартҳои аввалия ва қисмҳои рост ба даст оварда шудаанд. Натиҷаҳои бадастомада метавонанд ҳангоми моделсозии равандҳои динамикӣ дар физикаи назариявӣ ва математикаи амалӣ истифода шаванд.

Калидвожаҳо: муодилаҳои операторӣ-дифференсиалӣ, усули оператсионӣ, муодилаи хarakterистикӣ, пешниҳоди интегралӣ, функсияҳои оригиналӣ, теоремаи печии, решаҳои комплекси ҷамбаста.

ON THE INVESTIGATION OF A SYSTEM OF TWO OPERATOR-DIFFERENTIAL EQUATIONS BY THE OPERATIONAL METHOD

S.Q. Zarifzoda¹, B. K. Hasanov²
Tajik National University¹
Bakhtar State University after Nasir Khusrav²

Annotation. The paper investigates a system of two inhomogeneous operator-differential equations using the framework of operational calculus. The author proposes and thoroughly substantiates a method for constructing solutions to this system based on the properties of operator convolution. Three possible cases for the roots of the system's characteristic equation are examined in detail: real and distinct roots, double (equal) real roots, and complex conjugate roots. For each case, corresponding existence and uniqueness theorems are proven, and explicit analytical formulas for the general solutions are obtained in the form of integral representations of the original functions via specified boundary conditions and right-hand sides. The obtained results can be applied to modeling dynamic processes in theoretical physics and applied mathematics.

Keywords: operator-differential equations, operational method, characteristic equation, integral representation, original functions, convolution theorem, complex conjugate roots.

Сведения об авторах: Зарифзода Сарвар Кахрамон – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики факультета математики и механики Таджикского национального университета. Адрес: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки 17. Тел.: (+992 98) 561 91 83. E-mail: sarvar8383@list.ru.

Хасанов Бехруз Кенджабоевич - преподаватель кафедры математического анализа и дифференциальных уравнений Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Адрес: 735140. Республика Таджикистан, г. Бохтар, ул. Айни, 67. Тел.: (+992 90) 046 04 94. E-mail: behruz.hasanov.94@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллифон: Зарифзода Сарвар Қахрамон – д.и.ф. ва м., профессор, мудири кафедраи математикаи олии факултети математика ва механикаи Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. Суроға: 734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёб. Рӯдакӣ, 17. Тел.: (+992 98) 561 91 83. E-mail: sarvar8383@list.ru.

Ҳасанов Бехрӯз Кенҷабоевич - муаллими кафедраи таҳлили математикӣ ва муодилаҳои дифференсиалии Донишгоҳи давлатии Бохтар ба номи Носир Хусрав. Суроға: 735140, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Бохтар, к. Айнӣ, 67. Тел.: (+992 90) 046 04 94. E-mail: behruz.hasanov.94@mail.ru.

Information about the authors: **Zarifzoda Sarvar Kahramon** - DSc in Phys. & Math., Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Faculty of Mathematics and Mechanics, Tajik National University. **Address:** Rudaki Aven. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 98) 561 91 83. **E-mail:** sarvar8383@list.ru.

Khasanov Behruz Kenjaboevich - Lecturer in the Department of Mathematical Analysis and Differential Equations, Bokhtar State University after Nosir Khusrav. **Address:** Ayni Str. 67, Bokhtar, Tajikistan, 735140. **Phone:** (+992 90) 046 04 94. **E-mail:** behruz.hasanov.94@mail.ru.

УДК 519.87

ТАҲЛИЛИ МОДЕЛҲОИ МАТЕМАТИКИИ СИСТЕМАҲОИ ХИЗМАТРАСОНИИ ОММАВӢ ДАР МАСИРГУЗОРИИ ЭКОСИСТЕМАҲОИ РАҚАМИИ ТАҚСИМШУДА

Ёров М.Р.

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

Аннотатсия. Дар мақола таҳлили моделҳои математикии системаҳои хизматрасонию оммавӣ, ки барои масиргузорию ҷараёнҳои дархостҳо ва мувозинатсозии сарборӣ дар экосистемаҳои рақамии тақсимишуда истифода мешаванд, гузаронида шудааст. Моделҳои классикии $M/M/1$, $M/M/c$, $M/G/1$, $G/G/1$, инчунин шабакаҳои хизматрасонию оммавии Чексон ва Гордон-Ньюэлл баррасӣ гардида, имкониятҳо ва маҳдудиятҳои онҳо дар шароити ҳисоббарорию абрӣ, архитектураи микросервисӣ ва муҳитҳои рақамии зехнӣ арзёбӣ шудаанд. Нишон дода шудааст, ки рушди минбаъдаи системаҳои муносири иттилоотӣ ба ҳамгироии назарияи хизматрасонию оммавӣ бо усулҳои оптимизатсияи математикӣ, омӯзиши мошинӣ ва технологияҳои зехни сунъӣ вобаста мебошад.

Калидвожаҳо: системаҳои хизматрасонию оммавӣ, масиргузорӣ, мувозинатсозии сарборӣ, экосистемаҳои рақамии тақсимишуда, модели $M/M/1$, модели $M/M/c$, шабакаҳои Чексон, шабакаҳои Гордон-Ньюэлл, моделсозии математикӣ, ҳисоббарорию абрӣ, архитектураи микросервисӣ, зехни сунъӣ.

Муқаддима

Дар даҳсолаи охир рушди босуръати технологияҳои рақамӣ боиси гузариши системаҳои иттилоотии мутамарказ ба экосистемаҳои рақамии зехнӣ

гардидааст. Ин экосистемаҳо маҷмуи технологияҳои муосир, аз ҷумла архитектураи микросервисӣ, ҳисоббарориҳои абрӣ (cloud computing) ва канорӣ (edge computing), контейнерсозӣ ва дигар унсурҳои инфрасохтори тақсимшударо дар доираи муҳити ягонаи ҳисоббарорӣ муттаҳид менамоянд [1]. Дар чунин муҳит коркарди дархостҳои корбарон тавассути робитаи маҷмуи сервисҳои мустақил амалӣ гардида, истифодаи самараноки захираҳои ҳисоббарорӣ ва сифати баланди хизматрасонӣ таъмин карда мешавад.

Бо вуҷуди ин, рушди технологияҳои абрӣ, контейнерсозӣ ва архитектураи микросервисӣ раванди идоракунии захираҳои ҳисоббарориро ба таври назаррас мураккаб гардонидаст. Дар экосистемаҳои рақамии муосир ҳар як дархости корбар одатан тавассути якчанд микросервисҳои ба ҳам алоқаманд кор карда баромада мешавад, ки метавонад ба тақсимшавии нобаробари сарборӣ ва пастшавии самаранокии қори система оварда расонад. Дар чунин шароит истифодаи моделҳои математикӣ яке аз воситаҳои муҳими таҳлил ва пешгӯии рафтори системаҳои тақсимшуда боқӣ мемонад [1]. Тавассути моделҳои математикӣ имконияти арзёбии сарборӣ, таҳлили маҳсулноки ва асоснок намудани қарорҳои идоракунии захираҳои ҳисоббарорӣ фароҳам меояд.

Пояи назариявии чунин таҳқиқотҳоро назарияи хизматрасонии оммавӣ ташкил медиҳад, ки асосҳои он бори аввал аз ҷониби муҳаққиқи даниягӣ А.К. Эрланг пешниҳод шуда буданд [2]. Дар тули зиёда аз сад сол ин назария ба яке аз абзорҳои универсалии таҳлили равандҳои тасодуфии хизматрасонӣ табдил ёфта, имрӯз дар моделсозии системаҳои телекоммуникатсионӣ, шабакаҳои компютерӣ, ҳисоббарориҳои абрӣ ва дигар системаҳои иттилоотии тақсимшуда васеъ истифода мешавад.

Сарфи назар аз аҳамияти бунёдии назарияи классикии хизматрасонии оммавӣ, аксар моделҳои аналитикии он ба як қатор фарзияҳои сода, аз ҷумла статсионарӣ будани чараёнҳои воридшаванда, мустақил будани рӯйдодҳои пайдарпай ва доимӣ будани параметрҳои хизматрасонӣ асос меёбанд. Аммо экосистемаҳои рақамии муосир дар шароити сарбории ғайриватсионӣ, коррелятсияи баланди дархостҳо ва тағйирёбии пайвасти сохтори

инфрасохтори ҳисоббарорӣ фаъолият мекунад. Дар натиҷа, хусусиятҳои воқеии чунин муҳитҳо аз доираи татбиқпазирии қисми зиёди моделҳои классикии аналитикӣ берун мемонанд.

Таҳаввули абзори математикии назарияи хизматрасонии оммавӣ маҳз ба рафъи маҳдудиятҳои зикршуда равона гардидааст. Дар ин раванд моделҳои математикӣ аз системаҳои содаи пуассонӣ ва хизматрасонии якканала то моделҳои Марков, системаҳои бисёрканала, шабакаҳои хизматрасонии оммавӣ ва моделҳои худмонанди чараёнҳои дархостҳо пайваста такмил ёфта, имкониятҳои таҳлили равандҳои хизматрасониро ба таври назаррас густариш додаанд. Бо вуҷуди ин, азбаски саҳеҳии моделсозии математикӣ ҳамзамон ба мураккаб гардидани ҳисоббарориҳо оварда мерасонад, қисми зиёди равишҳои мавҷуда асосан ба таҳлили ҷузъҳои алоҳидаи инфрасохтори тақсимшуда нигаронида шудаанд. Дар натиҷа, масъалаҳои идоракунии экосистемаи рақамӣ ҳамчун системаи ягонаи ба ҳам алоқаманд ҳануз ҳам ҳалли мукаммали илмӣ худро интизоранд.

Дар таҳқиқотҳои муосир усулҳои алгоритмсозии масиргузориӣ дархостҳо, моделсозии математикӣ, мувозинатсозии сарборӣ ва технологияҳои зеҳни сунӣ, одатан, ҳамчун самтҳои мустақил ва алоҳидаи таҳқиқотӣ баррасӣ мешаванд. Аммо, новобаста ба ин, фаъолияти самаранок ва устувори экосистемаҳои рақамии тақсимшуда танҳо дар асоси ҳамгироии маҷмуии ин равишҳо дар доираи методологияи ягонаи мутобиқшаванда таъмин мегардад. Набудани чунин методология яке аз масъалаҳои мубрами илмӣ ин соҳа ба шумор рафта, имкониятҳои истифодаи самараноки моделҳои классикиро ҳангоми идоракунии муҳитҳои ҳисоббарориӣ дорои сарбории тағйирёбандаи баланд маҳдуд месозад.

Ҳадафи асосии таҳқиқоти мазкур аз гузаронидани таҳлили муқоисавии моделҳои математикӣ ва усулҳои назарияи хизматрасонии оммавии масъалаҳои масиргузориӣ дархостҳо ва мувозинатсозии сарборӣ дар экосистемаҳои рақамии тақсимшуда, муайян намудани афзалиятҳо, маҳдудиятҳо ва доираи татбиқи онҳо, инчунин асоснок намудани зарурати таҳияи методологияи

мутобиқшавандаи идоракунии чараёнҳои дархостҳо иборат мебошад. Методологияи пешниҳодшаванда бояд ҳамгирии имконоти назарияи классикии хизматрасонии оммавино ба технологияҳои муосири зеҳни сунӣ дар доираи системаи ягона таъмин намояд.

Асосҳои математикии назарияи хизматрасонии оммавӣ барои экосистемаҳои рақамии тақсимшуда. Назарияи хизматрасонии оммавӣ ҳамчун яке аз бахшҳои бунёдии математикаи амалӣ ташаккул ёфта, имрӯз асоси назариявии таҳқиқи равандҳои тасодуфӣи хизматрасонии дархостхоро дар системаҳои ҳисоббарорӣ ва телекоммуникатсионӣ ташкил медиҳад. Гарчанде моделҳои аввалини он барои таҳлил ва лоиҳакашии шабакаҳои телефонӣ пешниҳод шудаанд, рушди минбаъдаи ин назария боиси ташаккули маҷмуи усулҳои универсалии математикӣ гардида, имрӯз дар таҳлили платформаҳои абрӣ, архитектураҳои микросервисӣ ва экосистемаҳои рақамии тақсимшуда васеъ истифода мешаванд.

Асосҳои илмӣи назарияи хизматрасонии оммавӣ аз ҷониби А.К. Эрланг гузошта шудаанд. Ӯ бори аввал чараёни воридшавии дархостхоро ҳамчун раванди тасодуфӣ тавсиф намуда, имконияти арзёбии миқдории сифати хизматрасониро дар асоси моделҳои эҳтимолиӣ нишон дод.

Дар натиҷаи рушди минбаъдаи ин назария, масъалаҳои алоҳидаи муҳандисӣ тадриҷан ба воситаи мукаммалии математикӣ барои таҳлили системаҳои дорои захираҳои маҳдуди ҳисоббарорӣ табдил ёфтанд.

Яке аз аввалин натиҷаҳои амалии ин назария формулаи Эрланг-Би ба ҳисоб меравад, ки эҳтимолияти рад шудани дархостро дар системаҳои бе навбат муайян мекунад [3]:

$$B(n, a) = \frac{\frac{a^n}{n!}}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!}},$$

ки дар ин ҷо:

$B(n, a)$ – эҳтимолияти банд будани ҳамаи n -каналҳо, яъне занг ё дархост, рад рад мешавад;

n – шумораи каналҳои хизматрасонӣ;

a – сарбории пешниҳодишударо ифода менамоянд.

Формулаи мазкур фаъолияти системаҳоеро тавсиф менамояд, ки дар онҳо ҳангоми банд будани ҳамаи каналҳои хизматрасонӣ дархости нав қабул карда намешавад. Аз ин рӯ, он бештар барои моделсозии системаҳое, ки дар онҳо ташкили навбат пешбинӣ нашудааст, мувофиқ мебошад. Бо вучуди аҳамияти назариявӣ ва татбиқи васеъ, чунин фарзия ба аксар экосистемаҳои рақамии муосир мутобиқ нест, зеро дар онҳо дархостҳо, маъмулан, то озод гардидани захираҳои ҳисоббарорӣ дар навбат нигоҳ дошта мешаванд.

Барои таҳлили чунин системаҳо формулаи Эрланг-Си [4] пешбинӣ шудааст:

$$C(a, c) = \frac{\frac{a^c}{c!} \cdot \frac{c}{c-a}}{\sum_{k=0}^{c-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^c}{c!} \cdot \frac{c}{c-a}},$$

ки дар ин ҷо:

$C(a, c)$ – эҳтимолияти он ки дархост дар навбат меистад;

c – шумораи дастгоҳҳои хизматрасонӣ;

a – сарбории пешниҳодишударо ифода менамояд.

Ин вобастагӣ имконият медиҳад, ки эҳтимолияти интизории хизматрасонӣ ва вақти миёнаи интизории коркарди дархостҳо муайян карда шаванд. Бинобар ин, формулаи Эрланг-Си ҳамчун яке аз воситаҳои муҳими математикӣ барои баҳодиҳии нишондиҳандаҳои сифати хизматрасонӣ ва таҳлили таъхирҳои коркарди дархостҳо дар системаҳои ҳисоббарорӣ истифода мешавад.

Бояд қайд кард, ки ҳам формулаи Эрланг-Би ва ҳам Эрланг-Си ба фарзияи статсионарӣ будани сарборӣ ва экспоненсиалӣ будани вақти хизматрасонӣ асос ёфтаанд. Аз ин рӯ, имкониятҳои татбиқи онҳо дар экосистемаҳои рақамии муосир, ки фаъолияти онҳо бо сарбории тағйирёбанда, хусусиятҳои

ғайриякчинсаи захираҳои ҳисоббарорӣ ва динамикаи баланди муҳити ҳисоббарорӣ тавсиф мешавад, маҳдуд мебошанд.

Марҳилаи муҳими таҳаввули назарияи хизматрасонии оммавӣ бо пешниҳод гардидани таснифоти Кендалл оғоз ёфтааст. Таснифоти мазкур имконият фароҳам овард, ки синфҳои гуногуни системаҳои хизматрасонии оммавӣ дар доираи шакли ягонаи математикӣ ифода карда шаванд [5]:

$$\frac{\frac{A}{\frac{B}{\frac{C}{\frac{K}{N}}}}}{D},$$

ки дар ин ҷо:

- A – қонуни тақсими қараёни воридшаванда;
- B – қонуни тақсими вақти хизматрасонӣ;
- C – шумораи каналҳои хизматрасонӣ;
- K – ғунҷоии максималии система;
- N – шумораи манбаъҳои дархостҳо;
- D – низоми хизматрасониро ифода менамоянд.

Бояд зикр кард, ки таснифоти Кендалл имкониятҳои моделсозии математикӣ ва муқоисаи намудҳои гуногуни системаҳои хизматрасонии оммавиро ба таври назаррас васеъ намуда, таҳлили ягонаи архитектураҳои гуногуни ҳисоббарориро дар доираи воситаи ягонаи математикӣ таъмин карда тавонист.

Тӯли солҳои зиёд қараёни Пуассон ҳамчун модели асосии тавсифи қараёнҳои воридшавии дархостҳо истифода мешуд, ки эҳтимолияти пайдоиши k рӯйдодро дар фосилаи вақти t тавассути ифодаи зерин муайян менамуд [6]:

$$P\{N(t) = k\} = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}.$$

Афзалияти асосии модели Пуассон дар содагии таҳлили математикӣ ва мавҷудияти хусусиятҳои муҳим, аз ҷумла мустақил будани рӯйдодҳо, доимӣ будани шиддатнокии воридшавии дархостҳо ва баробар будани интизории математикӣ бо дисперсия ифода меёбад. Маҳз ҳамин хусусиятҳо боис гардиданд, ки қараёни Пуассон муддатҳои тӯлонӣ ҳамчун заминаи аксар

моделҳои классикии назарияи хизматрасонии оммавӣ мавриди истифода қарор гирад.

Бо вуҷуди ин, натиҷаҳои таҳқиқоти муосир дар самти таҳлили чараёнҳои дархостҳои (трафики) шабакавӣ нишон медиҳанд, ки хусусиятҳои воқеии чараёнҳои дархостҳо дар экосистемаҳои рақамии тақсимшуда аз фарзияҳои классикии модели Пуассон ба таври назаррас фарқ мекунанд. Аз ин рӯ, истифодаи ин модел на ҳамеша имкон медиҳад, ки хусусиятҳои динамикии муҳитҳои ҳисоббарории муосир бо дараҷаи кофӣи воқеъбинона инъикос карда шаванд.

Бо мақсади бартараф намудани ин маҳдудиятҳо дар назарияи хизматрасонии оммавӣ равандҳои таҷдидшаванда (renewal processes) пешниҳод гардиданд, ки истифодаи қонунҳои гуногуни тақсимои фосолаҳои байни воридшавии дархостҳоро имконпазир мегардонанд. Дар натиҷа, имкониятҳои моделсозии чараёнҳои воридшаванда нисбат ба модели классикии Пуассон васеъ гардида, ҷандирии воситаҳои математикӣ баланд мешавад. Бо вуҷуди ин имкониятҳо, равиши мазкур ҳамоно ба фарзияи мустақил будани воридшавиҳои пайдарпай таъя мекунад. Аз ин лиҳоз, дар шароите, ки байни дархостҳои пайдарпай вобастагии оморӣ ва коррелятсияи муваққатӣ мушоҳида мегардад, имкониятҳои татбиқи он маҳдуд боқӣ мемонанд.

Марҳилаи навбатии таҳаввули назарияи хизматрасонии оммавӣ бо ташаккул ва рушди моделҳои MAP (Markovian Arrival Process), BMAP (Batch Markovian Arrival Process) ва MMPP (Markov Modulated Poisson Process) алоқаманд мебошад. Бар хилофи модели классикии Пуассон, моделҳои мазкур тағйирёбии шиддатнокии воридшавии дархостҳоро вобаста ба ҳолати система ба назар гирифта, имконият медиҳанд, ки хусусиятҳои динамикии чараёнҳои воридшаванда бо дараҷаи баланди воқеъбинона инъикос карда шаванд. Илова бар ин, модели BMAP имконияти воридшавии гурӯҳии дархостҳоро тарҳрезӣ менамояд. Модели MMPP бошад, тағйирёбии тасодуфии шиддатнокии трафикро дар муҳитҳои динамикӣ ба инобат мегирад. Дар натиҷа, моделҳои мазкур нисбат ба моделҳои классикӣ худро барои таҳлили фаъолияти

платформаҳои абрӣ, архитектураҳои микросервисӣ ва системаҳои ҳисоббарории тақсимшуда мувофиқтар муаррифӣ мекунанд.

Бо вучуди афзалиятҳои зикршуда, татбиқи моделҳои MAP, VMAP ва MMRP ҳамчунин ба афзоиши назарраси мураккабии ҳисоббарориҳо меоранд. Бо зиёд шудани миқдори ҳолатҳои система андозаи матритсаҳои ҳисоббарорӣ низ мувофиқан меафзояд, ки ин истифодаи усулҳои аналитикиро маҳдуд намуда, татбиқи алгоритмҳои махсуси ададӣ ва воситаҳои ҳисоббарории баландмаҳсулро талаб мекунанд. Аз ин лиҳоз, истифодаи чунин моделҳо бештар дар он системаҳое асоснок ҳисобида мешавад, ки дар онҳо дақиқии баланди моделсозӣ нисбат ба арзиши ҳисоббарорӣ аҳамияти афзалиятнок дорад.

Марҳилаи навбатии таҳаввули назарияи хизматрасонии оммавӣ бо таҳқиқи хусусиятҳои «трафики худмонанд» алоқаманд мебошад. Бар хилофи равандҳои классикӣ стохастикӣ, чунин чараёнҳо дорои вобастагии дарозмуддати оморӣ буда, хусусиятҳои омории худро дар миқёсҳои гуногуни вақт нигоҳ медоранд. Маҳз ҳамин хусусият имкон медиҳад, ки онҳо рафтори воқеии трафики шабакаҳои компютерӣ, муҳитҳои абрӣ ва экосистемаҳои рақамии тақсимшударо нисбат ба моделҳои анъанавӣ бо дараҷаи бештари воқеъбинона инъикос намоянд.

Барои арзёбии дараҷаи худмонандии чараёнҳои трафик нишондиҳандаи Ҳерст истифода мешавад [7]:

$$0.5 < H < 1.$$

Ҳангоми зиёд гардидани қимати H дараҷаи вобастагии дарозмуддати байни рӯйдодҳо афзоиш меёбад ва эҳтимолияти ба вучуд омадани давраҳои тӯлонии сарбории баланд бештар мегардад. Натиҷаҳои таҳқиқотҳои амалӣ нишон медиҳанд, ки барои аксари хидматҳои абрӣ қимати нишондиҳандаи Ҳерст аз 0,7 зиёд мебошад. Ин ҳолат мавҷудияти хотираи дарозмуддати равандҳоро тасдиқ намуда, нишон медиҳад, ки моделҳои классикӣ вақти воқеии хизматрасониро пурра инъикос карда наметавонанд.

Дар экосистемаҳои рақамии муосир аксаран тақсимотҳои эҳтимолие (дорои «думҳои вазнин») мушоҳида мешаванд, ки барои онҳо эҳтимолияти сарбориҳои

фавқулода нисбатан баланд буда, тавассути вобастагии зерин тавсиф карда мешавад [8]:

$$P(X > x) \sim Cx^{-\alpha},$$

ки дар ин ҷо C – доимии меъёрбандӣ ва α – нишондиҳандаи суръати коҳишёбии тақсимот мебошад.

Чунин тақсимотҳо эҳтимолияти ба вучуд омадани таъхирҳои ғайримуқаррарӣ, хизматрасонии тулонӣ ва сарборихоро нисбат ба моделҳои экспоненсиалии анъанавӣ инъикос менамоянд. Аз ин рӯ, онҳо барои моделсозии муҳитҳои ҳисоббарории дорои динамикаи баланд аҳаммияти махсус доранд.

Ҳамин тариқ, таҳлили гузаронидашуда нишон медиҳад, ки рушди назарияи хизматрасонии оммавӣ дар самти наздик намудани моделҳои математикӣ ба хусусиятҳои воқеии экосистемаҳои рақамӣ сурат гирифтааст. Бо вучуди ин, баланд гардидани саҳеҳии моделҳо бо мураккабшавии ҳисоббарорӣ ва маҳдуд гардидани имконияти истифодаи усулҳои аналитикӣ ҳамроҳ мебошад. Аз ин рӯ, ҳеҷ яке аз моделҳои мавҷуда наметавонад дар як вақт саҳеҳии баланд, самаранокии ҳисоббарорӣ ва мутобиқшавӣ ба тағйирёбии динамикии сарбориро таъмин намояд. Ин ҳолат зарурати таҳияи методологияҳои нави мутобиқшавандаи идоракунии чараёни дархостҳоро ба миён меорад, ки имкониятҳои назарияи классикии хизматрасонии оммавиро бо алгоритмҳои муосири зеҳни сунъӣ дар доираи як системаи ягона ҳамгиро менамоянд.

Моделҳои классикии системаҳои хизматрасонии оммавӣ ва татбиқназирии онҳо дар экосистемаҳои рақамии тақсимишуда. Пас аз интихоби модели математикӣ барои тавсифи чараёни воридшавии дархостҳо, марҳилаи навбатии таҳқиқ ба моделсозии раванди хизматрасонии онҳо равона мегардад. Маҳз хусусиятҳои хизматрасонӣ нишондиҳандаҳои асосии фаъолияти система, аз ҷумла вақти интизорӣ, дарозии навбатҳо, дараҷаи истифодаи захираҳои ҳисоббарорӣ ва қобилияти гузаронандагии онро муайян менамоянд. Дар назарияи хизматрасонии оммавӣ таҳаввули моделҳои хизматрасонӣ ба таври пайдарпай сурат гирифта, аз системаҳои якканала оғоз шуда, минбаъд ба системаҳои бисёрканала ва моделҳои дорои қонунҳои умумии

тақсимои вақти хизматрасонӣ густариш ёфтааст. Ҳадафи асосии чунин таҳаввул бартараф намудани маҳдудиятҳои моделҳои ибтидоӣ ва мутобиқ сохтани онҳо ба хусусиятҳои воқеии системаҳои ҳисоббарории муосир мебошад.

Яке аз моделҳои маъмули назарияи хизматрасонии оммавӣ модели M/M/1 мебошад, ки фаъолияти системаи якканаларо бо чараёни воридшавандаи пуассонӣ ва вақти хизматрасонии дорои тақсимои экспоненсиалӣ тавсиф менамояд. Бо вуҷуди содагии сохтори математикӣ, ин модел заминаи қисми зиёди натиҷаҳои аналитикии назарияи хизматрасонии оммавино ташкил дода, то имрӯз барои арзёбии пешакии самаранокии серверҳои алоҳида, шлюзҳои API (application programming interface) ва микросервисҳои мустақил васеъ истифода мешавад.

Коэффитсиенти сарбории система бо вобастагии зерин муайян карда мешавад [9]:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu},$$

ки дар ин ҷо λ – шиддатнокии воридшавии дархостҳо ва μ – шиддатнокии хизматрасониро ифода менамоянд.

Ҳангоми иҷро гардидани шарт $\rho < 1$ система фаъолияти устувори худро нигоҳ медорад. Бо наздик шудани қимати ρ ба 1 вақти интизорӣ ва дарозии наубатҳо ба таври ғайрихаттӣ афзоиш ёфта, маҳсулнокии умумии система коҳиш меёбад [9, 10].

Нишондиҳандаҳои асосии модели якканалаи M/M/1 тавассути таносубҳои математикии зерин муайян карда мешаванд:

- шумораи миёнаи дархостҳо дар система:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho};$$

- дарозии миёнаи наубат:

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho};$$

- вақти миёнаи коркарди дархост дар система:

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda};$$

- вақти миёнаи интизорӣ:

$$W_q = \frac{\rho}{\mu - \lambda}.$$

Вобастагиҳои мазкур яке аз қонуниятҳои муҳими назарияи хизматрасонии оммавино инъикос менамоянд: ҳангоми зиёд шудани сарборӣ, вақти ҷавоби система нисбат ба суръати афзоиши ҷараёни воридшаванда хеле тезтар меафзояд. Аз ин ҷо, истифодаи пурраи захираҳои ҳисоббарорӣ ҳамеша ба баланд шудани самаранокии экосистемаҳои рақамии тақсимшуда мусоидат намекунад.

Сабаб дар он аст, ки тавре пештар қайд кардем, модели М/М/1 дорои як қатор маҳдудиятҳо мебошад. Пеш аз ҳама, модели мазкур танҳо як маркази хизматрасонӣ, шиддатнокии доимии воридшавии дархостҳо ва тақсими экспоненсиалии вақти хизматрасониро пешбинӣ менамояд. Дар амал бошад, дар муҳитҳои ҳисоббарории абрӣ дархостҳо байни шумораи зиёди серверҳо тақсим гардида, давомнокии коркарди онҳо аз хусусияти масъалаҳои ҳисоббарорӣ, ҳаҷми додаҳо ва ҳолати ҷорӣ система вобаста мебошад. Аз ин лиҳоз, модели М/М/1 бештар барои таҳлили ҷузъҳои алоҳидаи инфрасохтори тақсимшуда мувофиқ буда, наметавонад фаъолияти тамоми экосистемаро пурра тавсиф намояд.

Бо мақсади моделсозии кластерҳои серверӣ модели бисёрканалаи М/М/с пешбинӣ шудааст, ки дар он хизматрасонӣ тавассути якчанд дастгоҳи параллелӣ анҷом дода мешавад. Дар чунин система коэффитсиенти сарбории ҳар як канал бо формулаи зерин муайян карда мешавад [9]:

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu},$$

ки дар ин ҷо c – шумораи дастгоҳҳои хизматрасониро ифода мекунад.

Бар хилофи модели M/M/1, модели M/M/c сохтори марказҳои муосири коркарди додаҳо, кластерҳои контейнерӣ ва платформаҳои абриро воқеъбинона инъикос менамояд. Афзоиши шумораи каналҳои хизматрасонӣ эҳтимолияти ташаккули навбатҳоро коҳиш дода, устувории фаъолияти системаро дар шароити сарбории зиёд беҳтар месозад. Бо вуҷуди ин, самаранокии микёсбандӣ дар ин маврид низ хусусияти маҳдуд дошта, масъалаи интиҳоби шумораи оптималии каналҳои хизматрасонӣ ба масъалаи оптимизатсияи математикӣ табдил меёбад.

Маҳдудияти умумии моделҳои M/M/1 ва M/M/c дар он ифода меёбад, ки вақти хизматрасонии онҳо дорои тақсимои экспоненсиалӣ мебошад. Аммо дар амал, давомнокии коркарди дархостҳо аз мураккабии ҳисоббарорӣ, ҳаҷми додаҳо, таъхирҳои шабакавӣ ва хусусиятҳои татбиқи нармафзор вобастагӣ дорад.

Барои ба эътибор гирифтани ин хусусият модели M/G/1 кор карда баромада шудааст. Дар ин модел навъи чараёни воридшавандаи пуассонӣ нигоҳ дошта мешавад, аммо вақти хизматрасонӣ метавонад ба ҳар гуна қонуни тақсимот итоат намояд. Вақти миёнаи интизорӣ аз рӯи формулаи Поллачек-Хинчин муайян карда мешавад [11]:

$$W_q = \frac{p^2}{2(1 - \rho)},$$

ки дар ин ҷо $\rho < 1$ – моменти дуҷуми тақсимои вақти хизматрасонӣ мебошад.

Аз ин таносуби математикӣ бармеояд, ки вақти интизорӣ на танҳо аз давомнокии миёнаи хизматрасонӣ, балки аз дараҷаи парокандагии он низ вобаста аст. Дар натиҷа, ду платформаи ҳисоббарорӣ, ки маҳсулнокии миёнаи якхела доранд, метавонанд вобаста ба тағйирёбандагии вақти хизматрасонӣ вақти ҷавоби қомилан гуногун пешниҳод кунанд. Барои экосистемаҳои рақамии муосир ин хусусият аҳамияти махсус дорад, зеро маҳз нобаробарии сарбории ҳисоббарорӣ сабаби асосии пайдоиши изофасарбории маҳаллӣ мебошад.

Яке аз моделҳои умумитарини назарияи хизматрасонии оммавӣ модели G/G/1 ба ҳисоб меравад, ки дар он ҳам интервалҳои байни воридшавиҳо ва ҳам

вақти хизматрасонӣ метавонанд қонунҳои дилхоҳи тақсимотро дошта бошанд. Барои арзёбии вақти миёнаи интизорӣ дар чунин система формулаи тақрибии Кингман истифода мешавад [12]:

$$W_q \approx \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot \frac{C_a^2 + C_s^2}{2} \cdot E(S),$$

ки дар ин ҷо:

C_a^2 -квадрати коэффисиенти вариатсияи вақти байни омадани дархостҳо;

C_s^2 -квадрати коэффисиенти вариатсияи вақти хизматрасонӣ;

ρ - коэффисиенти истифодаи сервер;

$E(S)$ - вақти миёнаи хизматрасонӣ мебошад.

Ин формула нишон медиҳад, ки вақти ҷавоби система танҳо аз шиддатнокии миёнаи сарборӣ вобаста нест. Ба он дараҷаи тағйирёбандагии ҳар ду раванд низ таъсири ҷиддӣ мерасонанд. Аз ҳамин сабаб, моделҳои классикӣ аксар вақт давомнокии воқеии ҷавоби платформаҳои рақамиро, ки дар шароити тағйирёбандагии зиёди сарборӣ фаъолият мекунанд, кам арзёбӣ менамоянд.

Ҳамин тариқ, таҳлили муқоисавии моделҳои M/M/1, M/M/c, M/G/1, G/G/1 ва M/M/c/K нишон медиҳад, ки рушди пайдарпайи онҳо ба коҳиш додани маҳдудиятҳои моделҳои классикии хизматрасонии оммавӣ ва ба воқеияти экосистемаҳои рақамии муосир наздик намудани тавсифи математикии онҳо равона шудааст. Дар баробари ин, боло рафтани саҳеҳии моделсозӣ бо мураккаб шудани раванди ҳисоббарорӣ ва маҳдуд гардидани имконияти ёфтани ҳалли аналитикӣ ҳамчоя мегардад. Ғайр аз ин, ҳамаи моделҳои баррасишуда фаъолияти гиреҳҳои алоҳидаи хизматрасониро таҳлил менамоянд, дар ҳоле ки дар экосистемаҳои рақамии тақсимшуда дархости қорбар аз якҷанд марказҳои хизматрасонӣ пайдарпай мегузарад. Аз ин рӯ, барои таҳқиқи чунин муҳитҳо истифодаи шабакаҳои хизматрасонии оммавӣ зарур мебошад, ки онҳо ҳамкориҳои якҷанд маркази хизматрасониро дар доираи инфрасохтори ягонаи ҳисоббарорӣ моделсозӣ менамоянд.

Шабакаҳои хизматрасонии оммавӣ ҳамчун асоси математикии моделсозии экосистемаҳои рақамии тақсимшуда. Моделҳои классикии

системаҳои хизматрасонии оммавӣ фаъолияти маркази алоҳидаи хизматрасониро тавсиф намуда, имкон медиҳанд, ки танҳо хусусиятҳои маҳаллии фаъолияти система мавриди таҳлил қарор дода шаванд. Аммо экосистемаҳои рақамии тақсимшудаи муосир аз маҷмуи ҷузъҳои ба ҳам алоқаманд иборат буда, дар онҳо дархостҳои қорбарон зимни қоркард байни марказҳои гуногуни хизматрасонӣ пайдарпай интиқол дода мешаванд.

Дархости маъмули қорбар, дар ин маврид, пай дар пай аз дастгоҳи мувозинатсозии сарборӣ, шлюзи API, хидмати аутентификатсия, якчанд микросервис, пойгоҳҳои додаҳои тақсимшуда, брокерҳои паёмҳо ва хизматрасониҳои берунии ҳисоббарорӣ мегузарад. Аз ин рӯ, самаранокии фаъолияти чунин системаҳо на танҳо аз маҳсулнокии ҳар як ҷузъи алоҳида, балки аз хусусиятҳои ҳамкориҳои байни онҳо низ вобаста мебошад.

Зимни тасвири математикии ин гуна равандҳо алгоритми қори шабакаҳои хизматрасонии оммавӣ ба ҳисоб гирифта шуда, инфрасохтори ҳисоббарориҳои тақсимшуда ҳамчун маҷмуи марказҳои хизматрасонии ба ҳам алоқаманд баррасӣ мегардад. Бар хилофи моделҳои классикии якмаркази, шабакаҳои хизматрасонии оммавӣ масиргузориҳои дархостҳои байни гиреҳҳо, ташаккули ҷараёнҳои дохилӣ ва таъсири сарбориҳои маҳаллиро ба фаъолияти тамоми система ба назар мегиранд. Аз ин лиҳоз, онҳо барои таҳлили экосистемаҳои рақамии муосир асоси муҳими математикӣ ба ҳисоб мераванд.

Яке аз моделҳои маъруфи мутааллиқ ба ин синф шабакаҳои қушодаи Чексон ба ҳисоб мераванд. Дар чунин шабакаҳо дархост пас аз анҷоми хизматрасонӣ ё системаро тарк мекунад ва ё бо эҳтимолияти муайян ба маркази дигари хизматрасонӣ равона карда мешавад.

Шиддатнокии воридшавии дархостҳо ба ҳар як гиреҳ мувофиқи системаи муодилаҳои зерин муайян карда мешавад [13]:

$$\lambda_i = \gamma_i + \sum_{j=1}^N \lambda_j P_{ji},$$

ки дар ин чо λ_i – шиддатнокии воридшавии дархостхоро ба гиреҳи i -юм, γ_i – шиддатнокии чараёни i -юми берунаро ва P_{ji} – эҳтимолияти гузариши дархостро аз гиреҳи j -юм ба гиреҳи i -юм ифода мекунад.

Системаи муодилаҳои мазкур яке аз хусусиятҳои муҳими системаҳои ҳисоббарории тақсимшударо инъикос менамояд. Сарбории ҳар як чузъ фақат аз ҳисоби мурочиатҳои берунаи корбарон ташаккул намеёбад, балки аз ҳаҷми мубодилаи дохилии байни хизматрасониҳо низ вобаста мебошад. Дар архитектураҳои микросервисӣ шумораи мурочиатҳои дохилӣ аксар вақт нисбат ба шумораи дархостҳои беруна бештар аст. Аз ин рӯ, таҳлили чудоғонаи ҳар як чузъ бе дарназардошти таъсири мутақобилаи онҳо наметавонад арзёбии воқеии фаъолияти тамоми экосистемаро таъмин созад.

Барои ҳар як маркази хизматрасонӣ коэффитсиенти сарборӣ аз рӯйи таносуби маъмулии зерин муайян карда мешавад [9]:

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i},$$

ки дар ин чо μ_i – шиддатнокии хизматрасонии гиреҳи i -юм мебошад. Фаъолияти устувори шабака дар ҳолате таъмин мегардад, ки барои ҳамаи марказҳои хизматрасонӣ шарт $\rho_i < 1$ риоя гардад.

Дар шабакаҳои хизматрасонии оммавӣ зиёд гардидани сарбории танҳо як марказ метавонад боиси чамъшавии навбатҳо дар дигар гиреҳҳо гардида, ба пайдоиши таъсири занҷиравии сарборӣ оварда расонад. Ин ҳолат барои платформаҳои абрӣ ва системаҳои микросервисӣ хеле маъмул буда, зиёд гардидани вақти коркарди як хизматрасонӣ тадричан боиси афзоиши вақти ҷавоби тамоми хизматрасониҳои аз ҳам вобаста мегардад.

Яке аз бартариҳои муҳими шабакаҳои Чексон дар он ифода меёбад, ки онҳо имконияти муайян намудани тақсимои статсионари ҳолатҳоро дар шакли ҳосили зарби эҳтимолиятҳои гиреҳҳои алоҳида фароҳам меоранд. Ба шарофати ин хусусият масъалаи мураккаби таҳлили шабака ба таҳлили маҷмуи системаҳои нисбатан содаи хизматрасонии оммавӣ оварда шуда, ҳаҷми ҳисоббарориҳои математикӣ ба таври назаррас коҳиш меёбад.

Барои системаҳое, ки шумораи вазифаҳои саривақт иҷрошаванда дар онҳо бузургии доимӣ мебошад, шабакаҳои пӯшидаи Гордон-Ньюэлл истифода мешаванд. Дар чунин шабакаҳо шумораи умумии дархостҳо тағйир наёфта, муносибати математикии зерин иҷро мегардад [14]:

$$\sum_{i=1}^N n_i = K,$$

ки дар ин ҷо K – миқдори доимии дархостҳое мебошад, ки дар дохили шабака гардиш мекунанд.

Ҳамин тариқ, шабакаҳои Чексон ва Гордон-Ньюэлл марҳилаи муҳими рушди назарияи хизматрасонии оммавино ташкил дода, то ба имрӯз асоси моделсозии математикии системаҳои ҳисоббарории тақсимшуда ба ҳисоб мераванд. Сарфи назар аз ҳамаи ин пешравиҳо, таҳлили гузаронидашуда нишон медиҳад, ки имкониятҳои ин системаҳо ҳангоми омӯзиши экосистемаҳои рақамии худмубоқишаванда, ки сохтори онҳо пайваста тағйир ёфта, идоракунии онҳо бо истифода аз алгоритмҳои зеҳнӣ амалӣ мегардад, маҳдуд мебошанд. Аз ин рӯ, рушди минбаъдаи моделсозии математикӣ бояд ба ҳамгироии воситаҳои классикии назарияи хизматрасонии оммавӣ бо усулҳои оптимизатсияи математикӣ, омӯзиши мошинӣ ва технологияҳои зеҳни сунъӣ равона карда шавад, ки ин самти тадқиқоти минбаъдаи мазкурро асоснок менамояд.

Усулҳои масиргузории дархостҳо ва мувозинатсозии сарборӣ дар экосистемаҳои рақамии тақсимшуда. Таҳлили рушди системаҳои ҳисоббарории тақсимшуда нишон медиҳад, ки самаранокии онҳо на танҳо аз хусусиятҳои техникийи гиреҳҳои алоҳида, балки пеш аз ҳама аз тарзи тақсими чараёни дархостҳои воридшаванда вобаста аст. Ҳатто дар мавриди мавҷуд будани захираҳои кофӣ ҳисоббарорӣ, тақсимои номутаносиби масирҳо метавонад боиси сарбории зиёдатии баъзе гиреҳҳо, тӯлонитар шудани вақти ҷавоб ва дар натиҷа, коҳиши маҳсулнокии умумии система гардад. Аз ин лиҳоз, алгоритмҳои масиргузорӣ ва мувозинатсозии сарборӣ ҷузъҳои стратегии идоракунии экосистемаҳои рақамии тақсимшуда ба ҳисоб мераванд.

Аз нигоҳи назарияи хизматрасонии оммавӣ, масъалаи масиргузорӣ аз интихоби ончунон маркази хизматрасоне иборат аст, ки ҳадди ақали вақти интизорӣ, тақсимои мутавозини захираҳои ҳисоббарорӣ ва сатҳи зарурии сифати хизматрасониро таъмин намояд. Дар шакли умумӣ, тақсими ҷараёни дархостҳои воридшаванда бо муносибати математикии зерин ифода меёбад [15]:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i,$$

ки дар ин ҷо λ – шиддатнокии умумии ҷараёни дархостҳои воридшаванда, λ_i – шиддатнокии дархостҳое, ки ба гиреҳи ҳисоббарории i -юм равона карда мешаванд ва N – миқдори умумии гиреҳҳои системаро ифода мекунанд.

Муносибати мазкур нишон медиҳад, ки самаранокии системаи тақсимшуда, пеш аз ҳама, аз он вобаста аст, ки ҷараёни умумии дархостҳо то кадом андоза байни захираҳои мавҷуда ба таври оқилона тақсим карда мешавад.

Ҳамин тариқ, масъалаи асосии идоракунии экосистемаҳои рақамии тақсимшуда имрӯз на дар иваз намудани назарияи хизматрасонии оммавӣ бо технологияҳои зеҳни сунъӣ, балки дар ҳамгироии онҳо ифода меёбад. Назарияи хизматрасонии оммавӣ асоси математикӣ барои таҳлили навбатҳо, арзёбии сарборӣ ва пешгӯии сифати хизматрасониро фароҳам меорад, дар ҳоле ки алгоритмҳои зеҳнӣ имконият медиҳанд параметрҳои идоракунӣ ба шароити воқеии фаъолияти система мутобиқ гарданд. Аз ин рӯ, маҳз ҳамгироии ин ду равиш самти минбаъдаи рушди усулҳои математикӣ ва технологияҳои идоракунии ҷараёни дархостҳоро барои экосистемаҳои рақамии тақсимшуда ташкил медиҳанд.

Маҳдудиятҳои моделҳои классикӣ ва дурнамои рушди афзорҳои математикии назарияи хизматрасонии оммавӣ. Таҳлилҳо собит намуданд, ки рушди назарияи хизматрасонии оммавӣ бо тақмили пайдарпайи имкониятҳои тавсифи математикии системаҳои ҳисоббарорӣ ҳамқадам буда, заминаи назариявии таҳқиқи равандҳои хизматрасониرو ба таври назаррас

гузариш додааст. Гузариш аз моделҳои содаи якканалаи М/М/1 ба системаҳои бисёрканала, моделҳои дорои қонунҳои гуногуни тақсимои вақти хизматрасонӣ, шабакаҳои хизматрасонии оммавӣ ва равандҳои мураккаби стохастикӣ имкон дод, ки соҳеҳии моделсозии муҳитҳои ҳисоббарории тақсимшуда баланд бардошта шавад. Бо вуҷуди ин, экосистемаҳои рақамии муосир дорои хусусиятҳои мебошанд, ки онҳо аз доираи фарзияҳои асосии аксари моделҳои классикӣ берун мемонанд.

Яке аз маҳдудиятҳои моделҳои классикӣ ба фарзияи доимӣ будани параметрҳои система рабт дорад. Дар аксар моделҳои математикӣ шиддатнокии воридшавии дархостҳо ва хусусиятҳои хизматрасонӣ ҳамчун параметрҳои доимӣ ё сӯстағйирёбанда қабул карда мешаванд. Аммо дар муҳитҳои ҳисоббарории абрӣ ин нишондиҳандаҳо зери таъсири микёсбандии худкор, кӯчонишҳои мошинҳои виртуалӣ, ғайриқонунии нусхаҳои нави микросервисҳо ва азнавтасимшавии захираҳои ҳисоббарорӣ пайваста тағйир меёбанд. Дар чунин ҳолат параметрҳои модел аз вақт вобаста гардида, ёфтани ҳалли дақиқи математикӣ ба маротиба душвортар мегардад.

Маҳдудияти дигари моделҳои классикӣ ба ғайриҷамъиятии инфрасохтори ҳисоббарорӣ марбут мебошад. Моделҳои мазкур, одатан, ҳамаи дастгоҳҳои хизматрасониро аз ҷиҳати маҳсулнокии якхела меҳисобанд. Дар амал бошад, экосистемаҳои рақамии тақсимшуда аз гиреҳҳои иборатанд, ки аз рӯйи архитектураи протсессорҳо, ҳаҷми хотира, суръати шабака ва хусусиятҳои зерсистемаҳои нигоҳдории додаҳо аз ҳамдигар фарқ мекунанд. Аз ҳамин сабаб, ҳатто ҳангоми якхела будани чараҳои воридшавии дархостҳо вақти хизматрасонӣ ва дараҷаи сарбории гиреҳҳо метавонанд ба таври назаррас фарқ кунанд.

Омили муҳими дигари маҳдудкунандаи имконоти моделҳои классикӣ ба хусусиятҳои чараҳои воқеии дархостҳо алоқаманд мебошад. Натиҷаҳои таҳқиқоти трафики шабакавӣ нишон медиҳанд, ки чараҳои воридшаванда дорои хусусиятҳои ғайристатсионарӣ, худмонандӣ, вобастагии дарозмуддат ва воридшавии гурӯҳии дархостҳо мебошанд. Гарчанде барои моделсозии чунин

равандҳо моделҳои MAP, BMAP, MMPР ва моделҳои трафики худмонанд пешниҳод шуда бошанд ҳам, ҳеҷ яке аз онҳо наметавонад тамоми хусусиятҳои сарбории воқеиро бе мураккаб сохтани раванди ҳисоббарорӣ инъикос намояд. Аз ин рӯ, ҳангоми интихоби модели математикӣ ҳамеша масъалаи тавозуни байни содагии ҳисоббарорӣ ва саҳеҳии тавсифи система ба миён меояд.

Маҳдудияти назарраси дигари моделҳои пешин ба усулҳои классикӣ масиргузорӣ вобастагӣ дорад. Дар шабакаҳои анъанавии хизматрасонии оммавӣ эҳтимолияти гузариши дархостҳои байни гиреҳо бузургии доимӣ қабул карда мешавад. Аммо дар платформаҳои рақамии муосир масирҳои хизматрасонӣ вобаста ба ҳолати воқеии захираҳои ҳисоббарорӣ, таъхирҳои шабакавӣ ва талаботи сифати хизматрасонӣ пайваста тағйир меёбанд. Дар натиҷа, сохтори шабака хусусияти мутобиқшаванда касб намуда, истифодаи эҳтимолиятҳои собитӣ гузариш дигар воқеияти фаъолияти системаро пурра инъикос карда наметавонад.

Мушкилоти алоҳида зимни моделсозии муҳити микросервис ба миён меояд. Дар чунин системаҳо иҷрои як амалиёти корбар метавонад бо даҳҳо мурочиати дохилии шабакавӣ ҳамроҳ бошад, ки қисми онҳо пайдарпай ва қисми дигар ҳамзамон иҷро мегарданд. Дар натиҷа, байни хизматрасониҳо вобастагӣҳои мураккаб ба вучуд меоянд, ки тавсифи онҳо дар доираи шабакаҳои классикӣ хизматрасонии оммавӣ хеле душвор мебошад. Илова бар ин, сарбории зиёдати танҳо як микросервис метавонад ба зиёд шудани вақти интизорӣ дар тамоми занҷири хизматрасонӣ оварда расонад ва таъсири занҷиравии сарбориро ба вучуд оварад.

Маҳдудиятҳои дигари моделҳои классикӣ ба истифодаи технологияҳои виртуалӣ ва усулҳои контейнерсозӣ вобаста мебошанд. Дар чунин муҳитҳо маҳсулнокии система на танҳо аз имкониятҳои серверҳои физикӣ, балки аз сиёсати тақсимои захираҳо аз ҷониби гипервизор, механизмҳои оркестратсияи контейнерҳо ва низомҳои микёсбандии худкор низ вобастагӣ дорад. Ин равандҳо сохтори муҳити ҳисоббарориро пайваста тағйир медиҳанд, дар ҳоле

ки моделҳои классикии назарияи хизматрасонии оммавӣ чунин тағйиротро пурра ба назар гирифта наметавонанд.

Новобаста ба маҳдудиятҳои зикршуда, назарияи хизматрасонии оммавӣ аҳаммияти илмӣ худро нигоҳ дошта, ҳамчун пояи боззатимоди математикӣ барои таҳлили равандҳои хизматрасонӣ, баҳодиҳии навбатҳо, сарбории захираҳои ҳисоббарорӣ ва нишондиҳандаҳои сифати хизматрасонӣ ҳанӯз ҳам устуворона мавриди истифода қарор дорад. Аммо таҳти таъсири ин маҳдудиятҳо рушди моделсозии математикӣ тадричан аз усулҳои комилан аналитикӣ ба равишҳои маҷмӯӣ мегузарад. Дар чунин равишҳо моделҳои математикӣ бо усулҳои ададӣ, моделсозии тақлидӣ ва технологияҳои зехни сунъӣ ҳамгиро карда мешаванд. Дар натиҷа, қабули қарорҳои идоракунии ҳарчи бештар бо истифода аз алгоритмҳои мутобиқшавандаи зехнӣ амалӣ мегардад.

Дар солҳои охир рушди босуръати усулҳои омӯзиши мошинӣ ва омӯзиши тақвиятнок (reinforcement learning) имкониятҳои навро барои пешгӯии сарборӣ, мувозинатсозии захираҳо ва интихоби масирҳои беҳтари хизматрасонӣ фароҳам овардааст. Бар хилофи алгоритмҳои анъанавӣ, чунин усулҳо метавонанд таърихи фаъолияти система, қонуниятҳои пинҳонии тағйирёбии сарборӣ ва хусусиятҳои муҳити ҳисоббарориро ба назар гирифта, стратегияҳои мутобиқшавандаи идоракуниро ташаккул диҳанд. Бо вучуди ин, қисми зиёди чунин равишҳо бештар ба баланд бардоштани самаранокии амалӣ нигаронида шуда, асосноккунии кофӣи математикӣ надоранд. Аз ин рӯ, арзёбии устуворӣ, зътимоднокӣ ва пешгӯишавандагии фаъолияти онҳо ҳанӯз ҳам масъалаи мубрами илмӣ боқӣ мемонад.

Ҳамин тариқ, таҳлили гузаронидашуда нишон медиҳад, ки дурнамои рушди назарияи хизматрасонии оммавӣ на бо даст кашидан аз дастгоҳи классикии математикӣ, балки бо тақмили он тавассути ҳамгироӣ бо усулҳои муносири оптимизатсияи математикӣ, омӯзиши мошинӣ ва технологияҳои зехни сунъӣ алоқаманд аст. Дар чунин низоми ҳамгиро назарияи хизматрасонии оммавӣ пояи мустаҳками математикӣ барои тавсифи равандҳои хизматрасонӣ ва баҳодиҳии нишондиҳандаҳои фаъолияти система фароҳам меорад, дар ҳоле ки

алгоритмҳои зехнӣ мутобиқшавии қарорҳои идоракуниро ба шароити доимо тағйирёбандаи экосистемаҳои рақамии тақсимшуда таъмин менамоянд.

Аз ин рӯ, самти асосии рушди минбаъдаи ин соҳа ба таҳияи моделҳои гибриди вобаста мебошад, ки имкониятҳои таҳлили математикӣ ва усулҳои зехнии коркарди иттилоотро муттаҳид месозанд. Чунин ҳамгирой метавонад заминаи илмӣ эҷоди насли нави механизмҳои мутобиқшавандаи масиргузорӣ, мувозинатсозии сарборӣ ва идоракунии захираҳои ҳисоббарориро ташкил дода, ба баланд бардоштани самаранокӣ, устуворӣ ва эътимоднокии экосистемаҳои рақамии муосир мусоидат намояд.

Хулосаҳо

Таҳқиқоти таҳлилӣ бори дигар собит кард, ки назарияи хизматрасонии оммавӣ имрӯз ҳам яке аз пояҳои асосии математикӣ таҳқиқи равандҳои масиргузории дархостҳо ва мувозинатсозии сарборӣ дар экосистемаҳои рақамии тақсимшуда боқӣ мемонад. Моделҳои классикӣ $M/M/1$, $M/M/c$, $M/G/1$, $G/G/1$, инчунин шабакаҳои Љексон ва Гордон-Нюэлл бошанд, барои арзёбии вақти интизорӣ, дарозии навбат, коэффитсиенти сарборӣ ва қобилияти гузаронандагии системаҳои ҳисоббарорӣ заминаи назариявии мустаҳкам фароҳам меоранд.

Ҳамчунин, омӯзиши рушди технологияҳои ҳисоббарории абрӣ, архитектураи микросервисӣ ва муҳитҳои рақамии зехнӣ маҳдудиятҳои моделҳои классикиро ошкор сохтанд. Муайян гардид, ки муҳитҳои муосир бо ҷараёнҳои ғайристатсионарӣ, худмонандии трафик, ғайриякчинсагии захираҳо ва тағйирёбии динамикии инфрасохтор тавсиф мешаванд, ки истифодаи моделҳои анъанавиро маҳдуд месозанд.

Таҳлилҳои муқоисавӣ инчунин собит сохтанд, ки баланд гардидани саҳеҳии моделҳо ба мураккабшавии ҳисоббарорӣ ва маҳдуд шудани имконияти ҳалли аналитикӣ оварда мерасонад. Илова бар ин, ба таври ҷудогона омӯхтани моделҳои хизматрасонии оммавӣ, усулҳои оптимизатсия ва алгоритмҳои зехнӣ ташаккули методологияи ягонаи идоракунии мутобиқшавандаро мушкул мегардонад.

Аз ин рӯ, идоракунии самараноки экосистемаҳои рақамии тақсимшуда ҳамгироии назарияи хизматрасонии оммавӣ, усулҳои оптимизатсияи математикӣ ва технологияҳои зехни сунъиро талаб менамояд. Чунин равиш имкон медиҳад, ки ҳам асосноккунии қатъии математикӣ нигоҳ дошта шавад ва ҳам мутобиқшавии қарорҳои идоракунии ба шароити тағйирёбандаи муҳитҳои ҳисоббарорӣ таъмин гардад. Натиҷаҳои бадастомада зарурати таҳияи методологияи ягонаи идоракунии зехнии чараёни дархостҳоро асоснок намуда, заминаи назариявии таҳқиқоти минбаъдaro ташкил медиҳанд.

Адабиёт

1. Комилиён, Ф. С. Таҳаввули архитектураи системаҳои ҳисоббарории тақсимшуда: аз технологияҳои абрӣ то экосистемаҳои рақамии зехнии микросервисӣ / Ф.С. Комилиён, М.Р. Ёров // Фурӯғи илм. Бахши илмҳои табиӣ-риёзӣ. – 2026. – № 2.1 (10). – С. 252-261. – DOI: 10.24412/3078-395X-2026-2-10-252-261.
2. Федоткин М. А. Процессы обслуживания и управляющие системы // Математические вопросы кибернетики. – М.: Наука, 1996. – Вып. 6. – С. 51–70. URL: <http://library.keldysh.ru/mvk.asp?id=1996-51> (санаи мурочиат: 03.07.2026).
3. Yang H., Fu J., Wu J., Zukerman M. A study of a loss system with priorities // Heliyon. – 2024. Vol. 10. № 16. – e36109. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e36109. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11380183/> (санаи мурочиат: 16.06.2026)
4. Gopalakrishnan R., Zhong Y. Some asymptotic properties of the Erlang-C formula in many-server limiting regimes // Operations Research Letters. – 2024. Vol. 54. – Art. 107116. – DOI: 10.1016/j.orl.2024.107116. – URL: <https://arxiv.org/abs/2304.13845> (санаи мурочиат: 02.07.2026).
5. Хританков А. С. Модели и алгоритмы распределения нагрузки. Алгоритмы на основе сетей СМО // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2009. – № 3. – С. 33-48. – URL:

https://www.isa.ru/jitcs/images/stories/2009/03/33_48.pdf (санай мурочиат: 10.07.2026)

6. Хасанов А. С. Расчёт характеристик систем массового обслуживания в компьютерных классах // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. – 2024. – № 2. – С. 60-78.
DOI: 10.18384/2310-7251-2024-2-60-78 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschyot-haraktristik-sistem-massovogo-obsluzhivaniya-v-kompyuternyh-klassah> (санай мурочиат: 29.06.2026).
7. Dymora P., Mazurek M. Influence of Model and Traffic Pattern on Determining the Self-Similarity in IP Networks // Applied Sciences. – 2021. Vol. 11. № 1. – Art. 190. – DOI: 10.3390/app11010190. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/190> (санай мурочиат: 25.06.2026)
8. Park K., Kim G., Crovella M. On the Effect of Traffic Self-Similarity on Network Performance // Proceedings of SPIE International Conference on Performance and Control of Network Systems. – 1997. – P. 296–310. DOI: 10.1117/12.290419 URL: <https://www.cs.bu.edu/fac/crovella/paper-archive/spie97.pdf> (Санай мурочиат: 17.06.2026)
9. Ёров, М.Р. Татбиқи системаи хизматрасонии оммавӣ дар коркарди дархостҳои онлайнӣ / М. Р. Ёров, Ф. С. Комилиён // Паёми Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. Баҳши илмҳои табиӣ. – 2023. – No. 2. – P. 42-53. – EDN QTPBDV.
10. Комилиён, Ф.С. Татбиқи системаи хизматрасонии оммавӣ дар коркарди дузинагии ҳуҷҷатҳои онлайнӣ / Ф.С. Комилиён, М.Р. Ёров // Илм ва инноватсия. Баҳши илмҳои геологӣ ва техникӣ. – 2024. – No. 4. – P. 114-124. – EDN SRAWNA.
11. Лихтциндер Б.Я., Музыкантов К.В. ОБОБЩЕННАЯ ФОРМУЛА ХИНЧИНА-ПОЛЛЯЧЕКА // Экономика и социум. 2017. №6-2 (37). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obobschenaya-formula-hinchina-pollyacheka> (санай мурочиат: 14.07.2026).

12. New S. Modeling and Analysis of Manufacturing Systems / S. New // Journal of the Operational Research Society. – 1994. – Vol. 45, No. 6. – P. 725–726. – DOI: 10.1057/jors.1994.112. – URL: https://www.researchgate.net/publication/32002566_Modeling_and_Analysis_of_Manufacturing_Systems (санаи мурочиат: 30.06.2026).
13. MetricGate. Jackson Network Steady-State Analysis [Манбаи электронӣ]. – 2025. – URL: <https://metricgate.com/docs/queueing-network-jackson/> (санаи мурочиат: 03.07.2026).
14. De la Cruz N.-N., Daduna H. Analysis of second order properties of production–inventory systems with lost sales / N.-N. de la Cruz, H. Daduna // Annals of Operations Research. – 2023. – Vol. 331. – P. 899–921. – DOI: 10.1007/s10479-022-05061-z. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-022-05061-z> (санаи мурочиат: 26.06.2026).
15. Бочаров П. П. Об обслуживании на однолинейной пуассоно-эрланговской системе с ограниченным числом мест для ожидания и относительным приоритетом // Проблемы передачи информации. – 1969. – Т. 5. – Вып. 4. – С. 50-58. (mathnet.ru).

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В МАРШРУТИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ЦИФРОВЫХ ЭКОСИСТЕМ

Ёров М.Р.

Таджикский национальный университет

***Аннотация.** В статье проведён анализ математических моделей систем массового обслуживания, применяемых для маршрутизации потоков запросов и балансировки нагрузки в распределённых цифровых экосистемах. Рассмотрены классические модели $M/M/1$, $M/M/c$, $M/G/1$, $G/G/1$, а также сети массового обслуживания Джексона и Гордона-Ньюэлла; оценены их возможности и ограничения в условиях облачных вычислений, микросервисной архитектуры и интеллектуальных цифровых сред. Показано, что дальнейшее развитие современных информационных систем связано с интеграцией теории массового*

обслуживания с методами математической оптимизации, машинного обучения и технологиями искусственного интеллекта.

Ключевые слова: системы массового обслуживания, маршрутизация, балансировка нагрузки, распределённые цифровые экосистемы, модель M/M/1, модель M/M/c, сети Джексона, сети Гордона-Ньюэлла, математическое моделирование, облачные вычисления, микросервисная архитектура, искусственный интеллект.

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF QUEUEING SYSTEMS IN THE ROUTING OF DISTRIBUTED DIGITAL ECOSYSTEMS

M.R. Yorov

Tajik National University

Annotation. The article presents an analysis of mathematical models of queueing systems used for routing request flows and load balancing in distributed digital ecosystems. Classical models M/M/1, M/M/c, M/G/1, and G/G/1, as well as Jackson and Gordon-Newell queueing networks, are considered, and their capabilities and limitations in cloud computing, microservice architectures, and intelligent digital environments are evaluated. It is shown that the further development of modern information systems is associated with the integration of queueing theory with methods of mathematical optimization, machine learning, and artificial intelligence technologies.

Keywords: queueing systems, routing, load balancing, distributed digital ecosystems, M/M/1 model, M/M/c model, Jackson networks, Gordon-Newell networks, mathematical modeling, cloud computing, microservice architecture, artificial intelligence.

Маълумот оид ба муаллиф: Ёров Мехрод Рахматуллоевич – н.и.т., муаллими калони кафедраи информатикаи Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. **Суроға:** 734025, Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Рӯдакӣ, 17. **Тел.:** (+992 93) 305 50 03. **E-mail:** yorov.mehrdod@gmail.com.

Сведения об авторе: Ёров Мехрод Рахматуллоевич – к.т.н., старший преподаватель кафедры информатики Таджикского национального университета. **Адрес:** 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17. **Тел.:** (+992 93) 305 50 03. **E-mail:** yorov.mehrdod@gmail.com.

Information about the author: Yorov Mehrdod Rahmatulloevich – DSc in Tech., Senior Lecturer of the Department of Informatics, Tajik National University. **Address:** Rudaki Aven. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 93) 305 50 03. **E-mail:** yorov.mehrdod@gmail.com.

УДК:51

АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ БУДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Зиёмидинов Б.М., Туев Ш.Ш.

Горно-металлургический институт Таджикистана

Аннотация. В статье анализируются методологические аспекты отбора содержания, организации и технологий обучения дискретной математике для студентов направлений подготовки в области искусственного интеллекта. Показано, что фундаментальные разделы дискретной математики (математическая логика, теория графов, комбинаторика, теория алгоритмов, абстрактная алгебра, автоматы и формальные языки) формируют инструментальный каркас современных систем искусственного интеллекта и машинного обучения. Обосновывается необходимость перехода от традиционной «теоретно-доказательной» модели преподавания к практико-ориентированному, проектно-исследовательскому и алгоритмико-компетентностному подходами, учитывающим специфику профессиональной деятельности будущих специалистов в области искусственного интеллекта. Предлагается структурная модель курса дискретной математики для профиля «Искусственный интеллект», сформулированы методологические рекомендации по обновлению образовательных программ и разработке учебно-методического обеспечения по дискретной математике для будущих специалистов в области искусственного интеллекта.

Ключевые слова: дискретная математика, искусственный интеллект, методология обучения, профессиональная подготовка, математическая логика, теория графов, комбинаторика, теория алгоритмов, цифровые образовательные технологии.

Введение

Дискретная математика на протяжении нескольких десятилетий рассматривается как фундаментальная основа информатики и компьютерных

наук, обеспечивающая развитие абстрактного и алгоритмического мышления, формирование навыков строгого доказательного рассуждения и моделирования сложных систем. В условиях стремительного развития искусственного интеллекта, расширения сфер его применения и усложнения используемых моделей существенно возрастает роль дискретно-математического аппарата в подготовке специалистов данного профиля. Алгоритмы поиска, оптимизации, вывода, представления знаний, работы с графовыми структурами данных и сетями, лежащие в основе систем искусственного интеллекта, напрямую опираются на методы логики, теории графов, комбинаторики, теории алгоритмов и абстрактной алгебры [3, 41; 7, 12; 6, 18]. Вместе с тем, традиционные подходы к преподаванию дискретной математики зачастую не учитывают специфики профессиональных задач, решаемых специалистами по искусственному интеллекту, что приводит к разрыву между теоретической подготовкой и практикой разработки интеллектуальных систем [8, 638; 10, 105]. Это обуславливает необходимость методологического переосмысления содержания, целей и технологий обучения дискретной математики в образовательных программах по направлению «Искусственный интеллект».

Цель данной работы – теоретически обосновать и описать методологические аспекты изучения дискретной математики для будущих специалистов по искусственному интеллекту, предложить структуру и принципы построения учебного курса, а также обозначить методические рекомендации по его реализации в условиях цифровой образовательной среды.

Дискретная математика изучает структуры и процессы, обладающие дискретной природой: множества, отношения, графы, логические формулы, комбинаторные конфигурации, автоматы и т.п. [1, 12; 9, 7]. Именно такие структуры лежат в основе цифровых вычислительных систем, алгоритмов обработки информации, формальных моделей вычислений и значительной части методов искусственного интеллекта [4, 57; 3, 23].

В современной литературе выделяют несколько ключевых разделов дискретной математики, имеющих особое значение для искусственного интеллекта -ориентированной подготовки [1-10]:

- абстрактная алгебра*: группы, кольца, поля, структуры данных с операциями;

- математическая логика*: пропозициональная, предикатная, модальная, нечёткая логика;

- теория графов и сетей*;

- теория алгоритмов и вычислимости*;

- формальные языки и автоматы*;

- комбинаторика и элементы теории вероятностей и статистики в дискретной постановке*.

Эти разделы обеспечивают формализацию знаний и процедур, разработку и анализ алгоритмов, оценку сложности, построение моделей рассуждений, принятия решений и обучения, в том числе в условиях неопределённости [4, 129; 10, 107].

С методологической точки зрения дискретная математика выполняет функцию «моста» между классическими школьными темами (арифметика, элементарная алгебра, геометрия) и современными направлениями информатики и искусственного интеллекта, позволяя постепенно вводить обучающихся в мир формальных моделей, алгоритмического мышления и программной реализации математических конструкций [1, 6; 9, 3]. Такое понимание роли дискретной математики задаёт ориентиры для отбора содержания и форм организации обучения, ориентированных не только на усвоение теоретического материала, но и на формирование профессиональных компетенций в области искусственного интеллекта.

Профессиограмма специалиста по искусственному интеллекту включает широкий спектр компетенций:

- умение моделировать предметные области,

- разрабатывать и анализировать алгоритмы,

- использовать разнообразные структуры данных,
- применять методы логического и вероятностного вывода,
- проектировать и оптимизировать архитектуры интеллектуальных систем,
- работать с большими графовыми и реляционными структурами, а также интегрировать алгоритмы машинного обучения и методов знания-ориентированного искусственного интеллекта.

Перечисленные выше компетенции требуют развитых навыков абстрагирования, формального мышления, владения математическим аппаратом и опытом его применения в вычислительных экспериментах и программных проектах [3, 29; 9, 10].

Международные и национальные рекомендации по учебным планам в области компьютерных наук подчёркивают стратегическую роль дискретной математики как базового компонента, который должен предшествовать или параллельно сопровождать курсы по алгоритмам, структурам данных, теории вычислений, программной инженерии и искусственному интеллекту [4, 31; 10, 106]. При этом отмечаются типичные трудности студентов: слабая связь между абстрактным теоретическим материалом и практическими задачами программирования, недостаточное понимание смысла доказательств, формальных спецификаций и оценок сложности, а также низкая мотивация при изучении «формальной» математики без явной связи с будущей профессиональной деятельностью [8, 641; 11, 3].

Следовательно, методология преподавания дискретной математики для будущих специалистов по искусственному интеллекту должна опираться на: ориентацию на профессиональные задачи и кейсы из области искусственного интеллекта, интеграцию с курсами программирования и машинного обучения, поддержку вычислительных экспериментов и исследовательских проектов, использование средств искусственного интеллекта в качестве учебных инструментов, развитие навыков совместной работы над математико-алгоритмическими задачами [8, 642; 9, 190; 10, 109].

Отбор содержания дискретной математики для направления «Искусственный интеллект» должен осуществляться на основе сочетания фундаментальности, профессиональной релевантности и дидактической целесообразности [1, 8; 8, 639]. При этом предполагается модульное построение курса, позволяющее реализовать сквозную интеграцию с другими дисциплинами учебного плана и обеспечивать постепенное усложнение математического аппарата [9, 14; 10, 110].

Таблица 1 отражает возможную модульную структуру курса с акцентом на связь с типовыми задачами искусственного интеллекта.

Таблица 1. Модульная структура курса с акцентом на связь с типовыми задачами искусственного интеллекта

Модуль	Содержательные акценты	Типовые связи с ИИ
Логика и доказательства	Пропозициональная и предикатная логика, логический вывод, нормальные формы, доказательства по индукции	Системы логического вывода, проверка моделей, объяснимый искусственный интеллект, верификация правил и онтологий
Множества, отношения, структуры	Множества, отношения эквивалентности и порядка, частично упорядоченные множества, алгебраические структуры	Формальные онтологии, базы знаний, реляционные и графовые БД, представление состояний и действий
Теория графов и сетей	Графы, деревья, маршруты, потоки, центральность, случайные графы	Социальные и информационные сети, графовые нейронные сети, поиск путей,

Модуль	Содержательные акценты	Типовые связи с ИИ
		рекомендательные системы
Комбинаторика и дискретная вероятность	Подсчёт, размещения, сочетания, рекуррентные соотношения, дискретные распределения	Оценка сложности перебора, стохастические модели в ИИ, дискретные вероятностные графические модели
Теория алгоритмов и сложность	Модели вычислений, корректность и сложность алгоритмов, NP-полнота	Проектирование и анализ алгоритмов обучения, поиска, оптимизации, планирования
Автоматы и формальные языки	Конечные автоматы, грамматики, регулярные и контекстно-свободные языки	Обработка естественного языка, распознавание последовательностей, спецификация протоколов и диалогов

Данное структурирование обеспечивает логическую последовательность освоения материала, позволяет сочетать «вертикальную» линию фундаментальных понятий с «горизонтальными» профессиональными кейсами, демонстрирующими практическое применение математического аппарата в задачах искусственного интеллекта [8, 643; 10, 112].

Методологическая специфика обучения дискретной математике для будущих специалистов по искусственному интеллекту требует сочетания нескольких дидактических подходов [8, 640; 9, 188].

Проблемно-ориентированный и контекстный подход. Теоретические понятия вводятся через анализ реальных или приближенных к реальности задач искусственного интеллекта: построение графа знаний, формализация логических правил для экспертной системы, оптимизация маршрутов робота, конфигурирование нейронной сети как помеченного ориентированного графа и т.п. [4, 27; 10, 109]. Это позволяет формировать у обучающихся понимание функциональной роли дискретно-математических объектов в интеллектуальных системах.

Алгоритмико-компетентностный подход. Особое внимание уделяется формированию умений конструировать, анализировать и реализовывать алгоритмы, интерпретируя теоретические конструкции курса в виде программных модулей и компонентов искусственного интеллекта-систем [3, 23; 9, 190]. Важными результатами обучения становятся не только знания определений и теорем, но и способность реализовать алгоритмы поиска, вывода, оптимизации, анализа графов и комбинаторных структур на языках программирования, применяемых в искусственного интеллекта [3, 32; 4, 215].

Исследовательский и проектный подход. Студентам предлагаются мини-исследования и проектные задания: изучение поведения алгоритмов на различных наборах данных, поиск контрпримеров к гипотезам методом компьютерного эксперимента, разработка прототипов интеллектуальных модулей (например, системы вывода на базе логики предикатов или графовой рекомендательной системы) [2, 201; 4, 129; 10, 110]. Такой подход способствует развитию критического мышления, навыков постановки и решения исследовательских задач, а также опыта командной работы.

Интеграция обучения с цифровыми ресурсами и средствами ИИ. Важную роль играют интерактивные обучающие платформы, системы компьютерной алгебры, библиотеки для работы с графами и комбинаторными структурами, а также инструменты, использующие искусственный интеллект (интеллектуальные тренажёры, адаптивные системы тестирования, системы автоматической проверки доказательств и программ) [2, 215; 3, 1189; 9, 200]. Это

расширяет возможности индивидуализации траекторий обучения и оперативной обратной связи.

Принцип двуязычия «математика – программирование». Каждое ключевое понятие или теорема курса сопровождается разбором её программной интерпретации: например, граф как структура данных, логическая формула как объект в библиотеке логического вывода, комбинаторная задача как функция генерации и перебора [3,25;9,22]. Тем самым обеспечивается постоянный переход от формального языка математики к языкам программирования и обратно.

Современные разработки в области искусственного интеллекта и цифровых образовательных технологий открывают новые перспективы для методики преподавания дискретной математики [4, 27; 10, 113].

Во-первых, возможно применение интеллектуальных обучающих систем, которые автоматически подбирают задания по логике, графам, комбинаторике и алгоритмам в соответствии с текущим уровнем студента, анализируют типичные ошибки и формируют индивидуальные рекомендации [8, 643; 9, 196].

Во-вторых, активно развиваются средства автоматизации рассуждений и проверки доказательств, основанные на логическом выводе и системах типов, что позволяет включать в учебный процесс элементы формальной верификации аргументации студентов.

Применение библиотек и фреймворков для работы с графами, сетями и комбинаторными структурами (в том числе с поддержкой визуализации) облегчает понимание сложных абстракций и способствует формированию интуитивного представления о свойствах дискретных объектов [7, 23; 9, 210]. Интерес представляет также использование искусственного интеллекта для автоматизированного поиска контрпримеров и новых комбинационных структур в рамках учебно-исследовательских проектов, что демонстрирует студентам реальные направления современного научного поиска на стыке дискретной математики и искусственного интеллекта [2, 203; 10,113].

В-третьих, средства объяснимого искусственного интеллекта могут быть использованы как мета-инструмент: анализируя, какие элементы модели и какие фрагменты обучающих данных влияют на решения системы, можно соотносить это с понятиями логики, теории графов и дискретной вероятности, тем самым укрепляя связь между теорией и практикой [4, 257; 10, 112]. Таким образом, интеграция искусственного интеллекта-инструментов в процесс обучения дискретной математике позволяет не только повышать эффективность усвоения материала, но и формировать у студентов представление о том, как сами методы искусственного интеллекта опираются на дискретно-математический аппарат.

Исследования в области преподавания дискретной математики показывают, что студенты часто испытывают трудности при переходе от интуитивно-описательного к строго формальному уровню рассуждений, при понимании роли доказательств, а также при интерпретации абстрактных конструкций в терминах программной реализации [8, 640; 11, 4]. Для будущих специалистов по искусственному интеллекту данная проблема усугубляется необходимостью сочетать освоение сложного математического аппарата с параллельным изучением языков программирования, алгоритмов и инструментов машинного обучения [4, 31; 9, 188].

К числу типичных методических затруднений относятся: формальное заучивание определений и теорем без осознания их связи с задачами искусственного интеллекта; затруднения при построении собственных доказательств и аргументаций; трудности в оценке сложности алгоритмов; слабое владение графовыми и комбинаторными методами при решении прикладных задач [8, 641; 10, 110]. Для преодоления этих трудностей целесообразно:

- систематически связывать каждую новую тему с конкретными примерами из области искусственного интеллекта, включая упрощённые фрагменты индустриальных задач;
- использовать визуализацию (графы, диаграммы, анимации работы алгоритмов), интерактивные тренажёры и симуляторы;

- поощрять коллективное обсуждение решений задач и доказательств, применение методов «peer instruction» и взаимного рецензирования;
- внедрять регулярные мини-проекты, ориентированные на программную реализацию математических идей и проведение вычислительных экспериментов;
- применять адаптивные тестирующие системы и автоматическую проверку задач, что обеспечивает частую и быструю обратную связь [8, 642; 9, 200].

Выводы

Методологические аспекты изучения дискретной математики для будущих специалистов по направлению искусственного интеллекта связаны с необходимостью переосмысления целей, содержания и технологий обучения данной дисциплине в контексте современных требований к профессиональной подготовке. Дискретная математика выступает не только как фундаментальный раздел математического образования, но и как методологический каркас для конструирования, анализа и интерпретации интеллектуальных систем, включая логические, графовые, комбинаторные и алгоритмические компоненты [1, 5; 4, 27; 10, 113]. Эффективное обучение возможно при условии модульной организации курса, ориентации на профессиональные кейсы в области искусственного интеллекта, интеграции с программированием и машинным обучением, активного использования цифровых ресурсов и средств искусственного интеллекта в образовательном процессе [8, 643; 9, 190; 10, 112].

Перспективными направлениями дальнейших исследований и методических разработок являются:

- разработка адаптивных учебных курсов по дискретной математике с использованием технологий искусственного интеллекта;
- создание систем автоматизированной оценки доказательств и решений задач;
- разработка корпусных наборов прикладных задач, ориентированных на различные специализации внутри направления искусственного интеллекта, а также эмпирическое исследование влияния различных дидактических моделей на развитие математико-алгоритмического мышления студентов [8, 644; 11, 5].

Литература

1. Леонтьев В.К., Муськевич А.Э., Тумшевиц О.П. Дискретная математика и математические основы информатики. — М.: Academia, 2019. — 97 с.
2. Робинсон Дж. А., Воронков А.А. (ред.) Справочник по автоматическому доказательству теорем. В 2-х т. — М.: Физматлит, 2010. — С. 2128. ISBN 0444508139.
3. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. — М.: Вильямс, 2013. 3-е изд.— 1300 с.
4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA). — М.: Вильямс, 2021 (4-е изд.). — 704 с.
5. Попов Э.В. Общение с ЭВМ на естественном языке. — М.: Наука, 1982. — 360 с.
6. Мальцев А.И. Алгоритмы и рекурсивные функции. — М.: Наука, 1986. — 368 с.
7. Харари Ф. Теория графов. — М.: УРСС, 2017. — 304 с.
8. Овчинников В.А. Методические аспекты преподавания дискретной математики будущим ИТ-специалистам // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. — Т. 14. — № 3. — С. 638-647.
9. Гринченков В.Г., Потоцкий С.И. Дискретная математика для программистов: учебное пособие. — М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2016. — 316 с.
10. Тюгашев А.А. О роли дискретной математики в подготовке специалистов по искусственному интеллекту и большим данным // Высшее образование в России. 2020. — Т. 29. — № 10. — С. 105-114.

**ЧАНБАҲОИ ОМУЗИШИ РИЁЗИЯТИ ДИСКРЕТӢ БАРОИ МУТАХАССИСОНИ
ОЯНДАИ СОҲАИ ЗЕҲНИ СУНӢ**

Зиёмидинов Б.М., Туев Ш.Ш.

Донишқадаи кӯҳию металлургии Тоҷикистон

Аннотатсия. Дар ин мақола ҷанбаҳои методологии интихоби мундариҷа, ташикил ва технологияҳои таълими математикаи дискретӣ барои донишҷӯёни ихтисоси зеҳни сунъӣ таҳлил карда мешаванд. Нишон дода шудааст, ки бахшҳои асосии математикаи дискретӣ (мантиқи математикӣ, назарияи графҳо, комбинаторика, назарияи алгоритмҳо, алгебраи абстрактӣ, автоматҳо ва забонҳои расмӣ) ҷаҳорҷӯбаи асбоби зеҳни сунъӣ муосир ва системаҳои омӯзиши мошиниро ташикл медиҳанд. Дар мақола зарурати гузариш аз модели анъанавии таълими "исботӣ-назариявӣ" ба равишҳои ба амал нигаронидашуда, таҳқиқоти лоиҳавӣ ва алгоритмӣ асосёфта ба салоҳият асосёфта, ки хусусиятҳои фаъолияти касбии мутахассисони оянда дар соҳаи зеҳни сунъиро ба назар мегиранд, асоснок карда мешавад. Модели сохтори курси математикаи дискретӣ барои профили зеҳни сунъӣ пешниҳод карда мешавад. Тавсияҳои методологӣ барои навсозии барномаҳои таълимӣ ва таҳияи маводи таълимӣ дар математикаи дискретӣ барои мутахассисони оянда дар соҳаи зеҳни сунъӣ таҳия карда шудаанд.

Калидвожаҳо: математикаи дискретӣ, зеҳни сунъӣ, методологияи таълим, омӯзиши касбӣ, мантиқи математикӣ, назарияи графҳо, комбинаторика, назарияи алгоритмҳо, технологияҳои рақамии таълимӣ.

ASPECTS OF STUDYING DISCRETE MATHEMATICS FOR FUTURE SPECIALISTS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE

B.M. Ziyomidinov, Sh.Sh. Tuev

Mining – metallurgical Institute of Tajikistan

Annotation. This article analyzes the methodological aspects of selecting the content, organization, and technologies for teaching discrete mathematics to students majoring in artificial intelligence. It is shown that fundamental sections of discrete mathematics (mathematical logic, graph theory, combinatorics, theory of algorithms, abstract algebra, automata and formal languages) form the instrumental framework of modern artificial intelligence and machine learning systems. The necessity of transition from the traditional “theoretical-proof” model of teaching to a practice-oriented, project-research and algorithmic competence-based approaches, taking into account the specifics of the professional activities of future specialists in the field of artificial intelligence, is substantiated. A structural model of a discrete mathematics course for the Artificial Intelligence profile is proposed. Methodological recommendations for updating educational programs and developing teaching and

methodological support in discrete mathematics for future specialists in the field of artificial intelligence have been formulated.

Keywords: *discrete mathematics, artificial intelligence, teaching methodology, professional training, mathematical logic, graph theory, combinatorics, theory of algorithms, digital educational technologies.*

Информация об авторах: Зиёмидинов Баходур Мирзомидинович – к.ф.-м.н, доцент Горно-металлургического института Таджикистана. **Адрес:** 735730, Республика Таджикистан, г. Бустон, ул. А. Баротова 6. **Тел.:** (+992 92) 962 02 67. **E-mail:** ziemidinov@mail.ru.

Туев Шохин Шоевич – к.п.н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики и искусственного интеллекта Горно-металлургического института Таджикистана. **Адрес:** 735730, Республика Таджикистан, г. Бустон, ул. А. Баротова 6. **Тел.:** (+992 92) 753 19 88. **E-mail:** [Shohin – 8888@mail.ru](mailto:Shohin-8888@mail.ru).

Маълумот дар бораи муаллифон: Зиёмидинов Баходур Мирзомидинович – н.и.ф. ва м., дотсент, Институти куҳкорӣ ва металлургии Тоҷикистон, **Суроға:** 735730, Ҷумҳурии Тоҷикистон, Бустон, к. А. Баротов 6. **Тел.:** (+992 92) 962 02 67. **E-mail:** ziemidinov@mail.ru.

Туев Шохин Шоевич – н.и.п., дотсент, мудири кафедраи математикаи оӣ ва зеҳни сунӣ Институти куҳкорӣ ва металлургии Тоҷикистон. **Суроға:** 735730, Ҷумҳурии Тоҷикистон, Бустон, к. А. Баротов 6. **Тел.:** (+992 92) 753 19 88. **E-mail:** [Shohin – 8888@mail.ru](mailto:Shohin-8888@mail.ru).

Information about the authors: Ziemidinov Bahodur Mirzomidinovich - Cand. Sc. in Phys. & Math., Associate Professor, Mining-Metallurgical Institute of Tajikistan. **Address:** A. Barotov Str. 6, Buston, Tajikistan, 735730. **Phone:** (+992 92) 962 02 67. **E-mail:** ziemidinov@mail.ru.

Tuev Shohin Shoevich – Cand. Sc. in Pedag., Head of the Department of Higher Mathematics and Artificial Intelligence of the Mining – Metallurgical Institute of Tajikistan. **Address:** A. Barotov Str. 6, Buston, Tajikistan, 735730. **Phone:** (+992 92) 753 19 88. **E-mail:** [Shohin – 8888@mail.ru](mailto:Shohin-8888@mail.ru).

ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ ЛУЧИСТОМ ОБОГРЕВЕ ПЛАСТИНЫ

Казиджанова Н.М.

Филиал Московского государственного университета

имени М. В. Ломоносова в городе Душанбе

Аннотация. Рассматривается задача определения температурного поля в полупрозрачной пластине при одностороннем лучистом обогреве с переменным во времени тепловым потоком на одной поверхности и отводе тепла через другую поверхность. Для решения задачи использован метод совместного применения интегрального преобразования Лапласа и ортогональной проекции невязки. Получено приближенное аналитическое решение, дающее уже в первом приближении достаточно хорошее совпадение с точным решением, найденным классическими методами.

Ключевые слова: радиационно-кондуктивный теплообмен, уравнение теплопроводности, полупрозрачная среда, число Бугера, преобразование Лапласа, метод Бубнова-Галеркина.

Введение

Исследование температурных полей и напряжений в материалах, обладающих свойством частично поглощать лучистую энергию, приобретает интерес во многих областях техники. Этой тематике посвящено большое количество работ учёных МГТУ имени Баумана, которыми разработаны обобщенные аналитические и численные методы решения задач радиационно – кондуктивного теплообмена в полупрозрачных рассеивающих средах. Проанализируем одну из такого рода задач и применим для её решения приближенный аналитический метод расчёта, описанный в [1, 2], основанный на совместном применении интегрального преобразования Лапласа и метода Бубнова-Галеркина.

Постановка задачи

Рассмотрим полупрозрачную пластину толщины l , одна из поверхностей которой подвергается лучистому обогреву плотности $f(t)$ и через другую поверхность происходит отвод тепла. Таким образом, внутри пластины

образуются внутренние источники тепла, распределенные по закону Бугера.

Математическая модель этой задачи имеет вид [1]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\alpha}{l^2} Ki_0 \eta f\left(\frac{\alpha t}{l^2}\right) Bu \exp\left(-\frac{Bu x}{l}\right), \quad \theta(x, 0) = 0, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{x=0} = -(1 - \eta) Ki_0 f\left(\frac{\alpha t}{l^2}\right), \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\alpha}{l} \theta\right)_{x=l} = \frac{\alpha}{l}, \quad (2)$$

где $\theta(x, t) = \frac{T(X, Fo) - T_0}{T_c - T_0}$ - относительная избыточная температура,

$Ki_0 = \frac{q_0 l}{\lambda(T_c - T_0)}$, Bu - число Бугера.

Применяя преобразование Лапласа к задаче (1)-(2), получим граничную задачу

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} - \frac{p}{\alpha} \bar{\theta}(x, p) = -\frac{Ki_0}{l^2} \bar{f}(p) Bu \exp\left(-Bu \frac{x}{l}\right), \quad (3)$$

$$\bar{\theta}_x(0, p) = -(1 - \eta) Ki_0 \bar{\Phi}(p), \quad \left(\bar{\theta}_x + \frac{\bar{\theta}(x, p)}{l}\right)_{x=l} = \frac{\alpha}{lp}, \quad (4)$$

$$\bar{\theta}(x, p) = \int_0^\infty \theta(x, t) \exp(-pt) dt, \quad \bar{\Phi}(p) = \frac{l^2}{\alpha} \bar{f}\left(\frac{pl^2}{\alpha}\right),$$

решение которой $\bar{\theta}(X, p)$ находится во множестве представлений вида

$$\bar{\theta}_n(x, p) = \bar{F}(X, p) + \sum_{k=1}^n \bar{c}_k(p) \varphi_k(x),$$

где $\bar{F}(x, p)$ удовлетворяет граничным условиям (4), а координатные функции $\{\varphi_k(x)\}$ удовлетворяют соответствующим однородным условиям. Требуя, чтобы невязка была ортогональна всем координатным функциям, вместо оператора в левой части уравнения (3) получим дискретный аналог задачи (3)-(4) с симметричными положительно определенными матрицами (3).

Если в качестве $\bar{F}(x, p)$ выбрать

$$\bar{F}(x, p) = \frac{1}{p} + Ki_0 \bar{f}(p) \left(N - \frac{\eta \exp(-x Bu) + x Bu}{Bu} \right),$$

$$N = \frac{Bi + 1}{Bi} + \frac{\eta \exp(-Bu)(Bi - Bu)}{Bi Bu}$$

и $\varphi_k(x) = \frac{Bi+2k}{Bi} - x^{2k}$, то определяющая система метода Бубнова-Галеркина в первом приближении даст следующий результат:

$$\begin{aligned}\bar{c}_1(p) &= -\frac{p_1(Bi)}{2(p+p_1(Bi))} - \frac{Ki_0 p \bar{f}(p) M(\eta, Bi, Bu)}{p+p_1(Bi)}, \\ p_1(Bi) &= \frac{5Bi^2 + 15}{2Bi^2 + 10Bi + 15}, M = \frac{5(Bu^4(5Bi^2 + 20Bi + 24) + 4\eta M_1)}{16Bu^4(2Bi^2 + 10Bi + 15)}, \\ M_1 &= 2 \exp(-Bu) (3(Bu^2 Bi - Bu Bi^2 - Bi^2) + (Bi - Bu)(Bi + 3)Bu^5) \\ &\quad - 3(Bi Bu^3 + 2Bu^2 - 2Bi).\end{aligned}$$

В случае $f(t) = 1 - \exp(-tPd)$ относительная избыточная температура приводится к виду

$$\begin{aligned}\theta(x, t, Bi, Bu, \eta) &= 1 + Ki_0(1 - \exp(-tPd)) \cdot \\ &\left(N - \frac{\eta \exp(-xBu)}{Bu} + x \right) - 0,5p_1(Bi) \left(\frac{Bi+2}{Bi} - x^2 \right) \exp(-tp_1(Bi)) \\ &\quad + \frac{PdMKi_0}{Pd - p_1(Bi)} (\exp(-tPd) - \exp(-p_1 t)) \left(\frac{Bi+2}{Bi} \right. \\ &\quad \left. - x^2 \right)\end{aligned}\tag{5}$$

В [1] поставленная выше задача решена применением интегрального преобразования по переменной x . В сравнении с тем решением, (5) дало хорошее совпадение с точным решением.

С увеличением t для ограниченных функций $f(t)$, значение $\theta(x, t)$ приближается к точному решению стационарной задачи и $\lim_{t \rightarrow \infty} c_1(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \bar{c}_1(p) = 0$.

Если положить $\bar{F}(x, p) = \frac{1}{p} + \frac{q(p)l}{\lambda} \left(\frac{Bi+1}{Bi} - x \right)$ и в качестве первой базисной функции взять $\varphi_1(x) = N - \left(\frac{\eta \exp(-xBu)}{Bu} + x \right)$, то получим другое решение достаточно хорошей точности, которое за переходным режимом будет совпадать с точным решением для стационарного распределения температуры. При малых

числах Бугера ($0 \leq Bu < 1$) функцию диссипации энергии $W(Bu, x) = Bu \exp(-xBu)$ в интервале $0 \leq x < 1$ можно интерполировать частичной суммой ряда Тейлора в виде полинома четвертой степени $W_4(Bu, x) = BU \left(1 - xBu + \frac{(xBu)^2}{2!} - \frac{(xBu)^3}{3!} + \frac{(xBu)^4}{4!} \right)$ и находить температуру в наилучшем приближении во множестве многочленов. Для числа $Bu = 0,1$ достаточно интерполировать функцию $W(Bu, x)$ квадратичной функцией $(0,1 - 0,01x + 0,025x^2)$. При $\eta = 0$ из решения (5) получим формулу для изменения температуры в непрозрачной среде.

Если рассматривать задачу для полуограниченной среды, т.е. когда выполняется условие $0 \leq x < \infty$, то, в поставленной изначально задаче, для температуры $u(x, t) = T(x, t) - T_0$ вместо граничных условий третьего рода в точке $x = l$ рассматриваются предельные условия

$$\lim_{x \rightarrow \infty} u(x, t) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\partial u}{\partial x} = 0.$$

Для решения такого рода задач, как правило, используют преобразования Фурье. Если $f(t)$ функция облучения и внутренний источник тепла подчиняется следующему закону Бугера: $W(Bu, x) = Bu \exp(-xBu)$, то применяя косинус-преобразование Фурье к функции Бугера:

$$W_c(\mu, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty Bu \exp(-xBu) \cos \mu x dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Bu^2}{\mu^2 + Bu^2},$$

получим:

$$\begin{aligned} u(x, t) = & \frac{q_0 l (1 - \eta)}{\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{f(\tau)}{\sqrt{t - \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(t - \tau)}\right) d\tau \\ & + \frac{q_0 l \eta}{2 \lambda \sqrt{\pi}} \int_0^{Fo} \frac{f(\tau) d\tau}{\sqrt{t - \tau}} \int_0^\infty W(\alpha, Bu) \left(\exp\left(-\frac{(x + \alpha)^2}{4(t - \tau)}\right) \right. \\ & \left. - \exp\left(-\frac{(x - \alpha)^2}{4(t - \tau)}\right) \right) d\alpha. \end{aligned}$$

Выводы

Таким образом,

$$T(x, t) = T_0 + \frac{q_0 l (1 - \eta)}{\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{f(\tau)}{\sqrt{t - \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(t - \tau)}\right) d\tau + \frac{2q_0 l \eta}{\pi} \int_0^\infty \frac{Bu^2 \exp(-\mu^2(t - \tau))}{\mu^2 + Bu^2} \cos x \mu d\mu. \quad (6)$$

Сходимость несобственного интеграла в правой части равенства (6) следует из того, что при любых $t - \tau > 0$ справедливо неравенство

$$\int_0^\infty \frac{Bu^2 \exp(-\mu^2(t - \tau))}{\mu^2 + Bu^2} d\mu \leq \int_0^\infty \frac{Bu^2}{\mu^2 + Bu^2} \cos x \mu d\mu = \frac{\pi Bu}{2} \exp(-x Bu).$$

Выводы

Проведено исследование нестационарного радиационно-кондуктивного теплообмена в полупрозрачной пластине при одностороннем лучистом воздействии и теплоотводе через противоположную поверхность. Учёт объёмного поглощения радиационной энергии осуществлён посредством источника теплоты, распределенного по закону Бугера.

Для решения сформулированной краевой задачи применен метод, основанный на последовательном использовании интегрального преобразования Лапласа и ортогональной проекции невязки по методу Бубнова–Галеркина. Полученная постановка позволяет представить решение в виде конечного разложения по координатным функциям и определить его коэффициенты из системы алгебраических уравнений.

На примере первого приближения получено аналитическое выражение для относительной избыточной температуры при экспоненциально изменяющемся во времени тепловом воздействии. Сопоставление с точным решением показывает, что даже при использовании одной координатной функции

обеспечивается достаточно высокая точность описания температурного поля. Это подтверждает эффективность рассматриваемого приближенного подхода для анализа переходных тепловых процессов в полупрозрачных средах.

Установлено, что при ограниченном во времени или ограниченном по величине внешнем тепловом воздействии переходный процесс с увеличением времени стремится к стационарному состоянию. При малых значениях числа Бугера пространственное распределение объёмного источника может быть с достаточной точностью аппроксимировано полиномиальной зависимостью, что даёт возможность существенно упростить аналитические расчёты.

Показано также, что при нулевой доле поглощённой в объёме энергии полученные соотношения переходят в соответствующий случай непрозрачной среды. Для полуограниченной среды применение косинус-преобразования Фурье позволяет получить интегральное представление температурного поля и установить сходимость возникающего несобственного интеграла.

Таким образом, совместное применение преобразования Лапласа и метода Бубнова–Галеркина может рассматриваться как эффективный инструмент получения приближенных аналитических решений задач нестационарного радиационно-кондуктивного теплообмена. Преимуществом метода является возможность получения компактных расчётных зависимостей при сохранении удовлетворительной точности, что делает его перспективным для инженерного анализа и параметрических исследований тепловых процессов в полупрозрачных материалах.

Литература

1. Елисеев В.Н., Суржиков С.Т. Нестационарное температурное поле в полупрозрачной пластине// Труды МВТУ, 1976. – №205. – С. 5-43.
2. Цой П.В. Системные методы расчёта краевых задач тепло-массопереноса// М.: Изд.: МЭИ, 2005. – 568 с.

ИНТИҚОЛИ ҒАРМЇ ДАР ПЛАСТИНА ҲАНГОМИ ҒАРМШАВИИ РАДИАТСИОНЇ

Қозичонова Н.М.

Филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе

Аннотатсия. Масъалаи муайян кардани майдони ҳарорат дар пластинаи нимшаффоф дар сурати гармкунии яктарафаи радиатсионӣ бо ҷараёни гармии тағйирёбанда дар як сатҳ ва хориҷ кардани гармӣ тавассути сатҳи дигар баррасӣ мешавад. Барои ҳалли масъала истифодаи яқояи табдили интегралӣ Лаплас ва усули проексияи ортогоналии тафриқа истифода мешавад. Ҳалли тақрибии аналитикӣ ба даст оварда шудааст, ки ҳатто дар тақриби аввал бо ҳалли дақиқи бо истифода аз усулҳои классикӣ ёфташуда мувофиқати хуб медиҳад.

Калидвожаҳо: интиқоли гармии радиатсионӣ-гузаронанда, муодилаи гармигузаронӣ, муҳити шаффоф, адади Бугер, табдили Лаплас, усули Бубнов-Галеркин.

HEAT TRANSFER IN A PLATE UNDER RADIANT HEATING

N.M. Kazidzhanova

Lomonosov Moscow State University in Dushanbe

Annotation. The problem of determining the temperature field in a semytranslucent plate under unilateral radiant heating with a time-varying heat flux on one surface and heat removal through the other surface is considered. A combined application of the integral Laplace transform and orthogonal projection of the residual is used to solve the problem. An approximate analytical solution is obtained that, even in the first approximation, provides fairly good match with the exact solution found using classical methods.

Keywords: radiative-conductive heat transfer, heat-transfer equation, translucent medium, Bouguer number, Laplace transform, orthogonal projection of the residual.

Сведения об авторе: Казиджанова Нодира Марифатовна – к.т.н., доцент кафедры «Математика и естественные науки» филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. **Адрес:** 734003, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Бохтар 35/1. **Тел.:** (+992 90) 782 04 09. **E-mail:** aridon31@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллиф: Қозичонова Нодира Маърифатовна – н.и.т., дотсенти кафедраи математика ва илмҳои табиӣ филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В.

Ломоносов дар шаҳри Душанбе. **Суроға:** 734003, Ҷумҳурии Тоҷикистон, Душанбе, к. Бохтар 35/1. **Тел.:** (+992 90) 782 04 09. **E-mail:** aridon31@mail.ru.

Information about the author: **Kazidzhanova Nodira Marifatovna** – Cand. Sc. in Tech., Associate Professor of the Department of Mathematics and Natural Sciences of the Lomonosov Moscow State University in Dushanbe. **Address:** Bokhtar Str. 35/1, Dushanbe, Tajikistan, 734003. **Phone:** (+992 90) 782 04 09. **E-mail:** aridon31@mail.ru.

УДК 544+544-971

ВЛИЯНИЕ БАРИЯ НА ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ СПЛАВА АК10Ц10

Абдулхамиди Джама

Институт химии имени В.И. Никитина

Национальной академии наук Таджикистана

Аннотация. В работе методом термогравиметрии в изотермических условиях исследован процесс высокотемпературного окисления алюминиевого литейного сплава АК10Ц10, модифицированного барием. Эксперименты проводились на воздушной среде в широком интервале температур с целью оценки кинетических параметров и термостабильности материала. Установлено, что введение бария (до 1.0 масс. %) оказывает ингибирующее действие на процесс окисления, снижая удельное изменение массы и истинную скорость взаимодействия сплава с кислородом. На основе кинетических кривых рассчитаны кажущаяся энергия активации и термодинамические функции процесса. Показано, что барий способствует формированию более плотной, гомогенной оксидной структуры, которая эффективно блокирует диффузию ионов и повышает жаростойкость сплава, что расширяет перспективы его применения в узлах трения и теплонагруженных деталях транспортного машиностроения.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, силумины, сплав АК10Ц10, легирование, барий, высокотемпературное окисление, термогравиметрия, кинетика окисления, энергия активации, термостабильность, защитные оксидные плёнки.

Введение

Алюминиевые литейные сплавы системы Al–Si–Zn, к которым относится сплав АК10Ц10, находят широкое применение в современном транспортном машиностроении, авиационной и автомобильной промышленности. Высокий интерес к данной системе обусловлен превосходными литейными свойствами, низкой усадкой, высокой удельной прочностью и хорошей обрабатываемостью. Однако при работе в условиях повышенных температур эксплуатационный

ресурс деталей из сплава АК10Ц10 существенно ограничивается из-за интенсивного высокотемпературного окисления. Наличие цинка и кремния в составе сплава при температурах выше 300–400 °С приводит к деструкции поверхностных слоев и формированию неоднородных, пористых оксидных пленок, которые не обладают достаточными защитными свойствами [1, 2].

Одним из наиболее эффективных и экономически оправданных методов повышения жаростойкости и термостабильности алюминиевых матричных систем является их микролегирование и модифицирование щелочноземельными металлами. Введение в расплав бария (Ba) позволяет направленно изменять кинетику окислительных процессов. Барий, обладая высокой химической активностью и большим атомным радиусом, концентрируется на границах зерен и в поверхностных слоях, подавляя рост рыхлых некогерентных фаз. Это способствует трансформации структуры оксидного слоя в более плотное, гомогенное состояние и значительно замедляет диффузию ионов кислорода к границе раздела фаз металл-газ [3-6].

Несмотря на наличие отдельных работ, посвященных модифицированию силуминов различными элементами, систематические данные о влиянии микродобавок бария на высокотемпературное окисление сложнолегированного сплава АК10Ц10 в литературе практически отсутствуют. Остаются неизученными механизмы совместного влияния кремния, цинка и бария на фазовый состав образующихся окалин, а также количественные параметры процесса, такие как истинная скорость окисления и кажущаяся энергия активации в изотермических условиях. Без этих данных невозможно научно обоснованно управлять жаростойкостью материалов, работающих в экстремальных тепловых режимах.

Целью настоящей работы является комплексное исследование кинетики и механизма высокотемпературного окисления алюминиевого сплава АК10Ц10, легированного барием (до 1.0 масс. %), методом изотермической термогравиметрии. Для достижения поставленной цели были решены задачи по установлению зависимости удельного изменения массы сплавов от времени и

температуры, расчету основных кинетических параметров и энергии активации процесса, а также оценке барьерных свойств, формирующихся защитных оксидных пленок.

Математическая обработка кинетических данных проводилась графоаналитическим методом. Среднюю скорость окисления ($K_{\text{ср}}, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) определяли по тангенсу угла наклона касательных, проведённых к экспериментальным кривым зависимости удельного прироста массы от времени ($\Delta m/S = f(\tau)$). Использование данного подхода в сочетании с температурными зависимостями позволило рассчитать кажущуюся энергию активации процесса по уравнению Аррениуса.

Результаты и их обсуждение

Анализ кинетических и энергетических параметров процесса высокотемпературного окисления модифицированного алюминиевого сплава АК10Ц10, представленных в табл. 1, выявил устойчивую зависимость скорости межфазного взаимодействия от концентрации бария и температуры эксперимента. Установлено, что истинная скорость окисления исходного сплава (без бария) в исследованном интервале температур 723–823 К закономерно возрастает от $2.00 \cdot 10^{-4}$ до $2.46 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Введение бария во всем изученном диапазоне концентраций (от 0.01 до 1.0 масс. %) приводит к интенсификации процесса окисления. Так, при максимальном содержании легирующего компонента (1.0 масс. % Ва) значения истинной скорости достигают $2.75 \cdot 10^{-4} \div 3.31 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при аналогичных температурных режимах [7-10].

Экспериментально зафиксировано монотонное снижение кажущейся энергии активации (E_a) от 108.5 кДж/моль для нелегированного образца до 86.3 кДж/моль для сплава, содержащего 1.0 масс. % бария. Данная динамика обусловлена глубокими структурно-фазовыми изменениями в формирующемся оксидном слое. Защитные (барьерные) свойства поверхностной пленки на сплаве АК10Ц10 традиционно определяются её сплошностью, стехиометрией и дефектностью кристаллической решетки.

Таблица 1. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплава АК10Ц10 с барием, в твёрдом состоянии

Содержание бария в сплаве, масс. %	температура окисления, К	истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	723	2.00	108.5
	773	2.25	
0.01	723	2.27	95.7
	773	2.54	
0.03	723	2.38	92.1
	773	2.75	
0.5	723	2.57	89.0
	773	2.88	
1.0	723	2.75	86.3
	773	3.05	

K - истинная скорость окисления;

E_a - кажущаяся энергия активации окисления

Барий, обладая значительно более высоким сродством к кислороду и существенно большим атомным радиусом по сравнению с базовыми компонентами матрицы (алюминием, кремнием и цинком), сегрегирует на границах зерен и перераспределяется в поверхностные слои расплава при кристаллизации. При высокотемпературном нагреве барий инициирует формирование многокомпонентных оксидных фаз, характеризующихся пониженной плотностью упаковки и повышенной дефектностью. Рост доли мелкодисперсных некогерентных включений в матрице оксида кремния и алюминия приводит к разрыхлению защитного слоя. Это существенно облегчает транспорт ионов кислорода через дефекты пленки к границе раздела фаз металл–

газ, что экспериментально подтверждается снижением энергетического барьера реакции (энергии активации).

На рис. 1 представлены изохроны окисления алюминиевого сплава АК10Ц10 при температурах 723 К и 823 К.

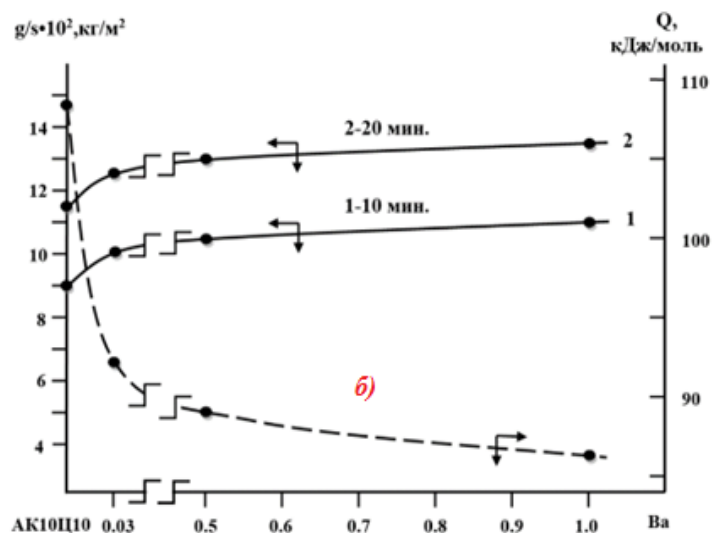
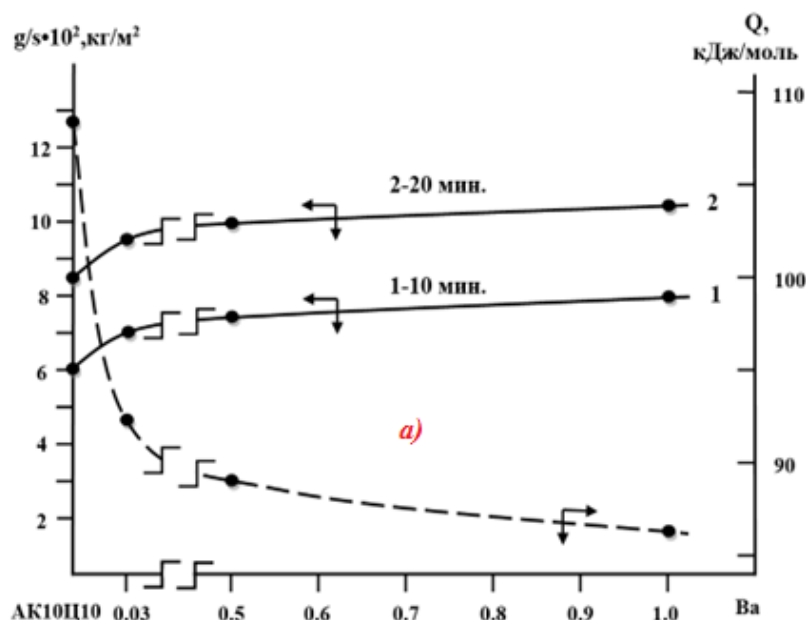


Рисунок 1. Изохроны окисления алюминиевого сплава АК10Ц10 в зависимости от содержания бария (мас. %) при температурах 723 К (а) и 823 К (б). Время экспозиции — 60 мин.

Анализ изохрон полностью подтверждает выявленную кинетическую тенденцию: с ростом содержания бария в сплаве во всем исследованном диапазоне до 1.0 масс. % наблюдается монотонное увеличение удельного привеса массы образцов.

Данный рост скорости взаимодействия сплава с кислородом воздуха сопровождается закономерным снижением кажущейся энергии активации процесса, зафиксированным в табл. 1. Полученные экспериментальные данные указывают на то, что барий, выступая в роли поверхностно-активного модификатора, инициирует формирование более рыхлой и дефектной структуры оксидной пленки. Это существенно снижает энергетический барьер для диффузии окислителя к реакционной поверхности металла и приводит к интенсификации высокотемпературного окисления.

На рис. 2 представлены температурные зависимости истинной скорости окисления исследуемых сплавов в полулогарифмических координатах Аррениуса $\lg K - 1/T$.

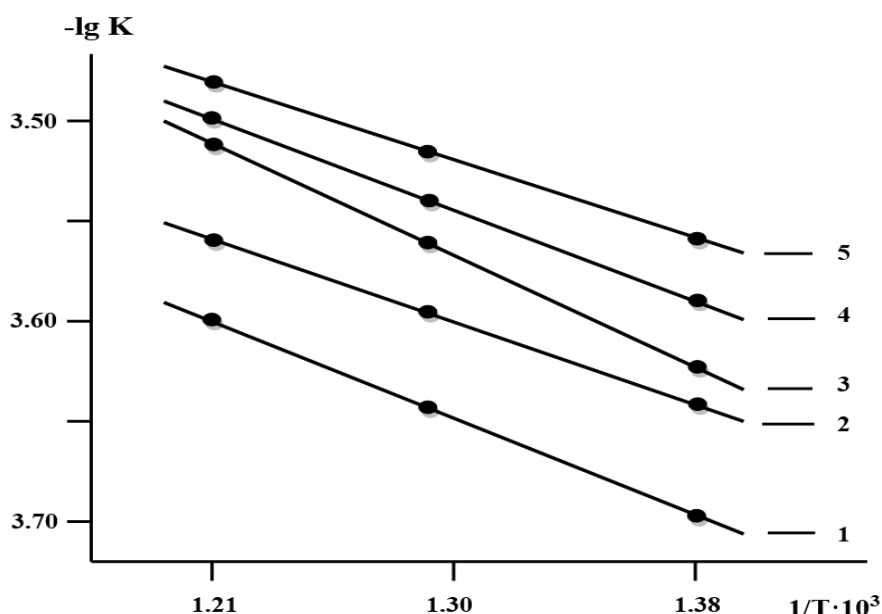


Рисунок 2. Зависимость $-\lg K$ от $1/T$ для сплава АК10Ц10 (1) с барием, масс. %: 0.01 (2); 0.03 (3); 0.5 (4); 1.0 (5)

Установлено, что во всем изученном интервале температур (723-823 K) экспериментальные точки удовлетворительно описываются линейной зависимостью со степенью достоверности аппроксимации, близкой к единице. Это строго подтверждает правомерность применимости классического уравнения Аррениуса для описания кинетики гетерогенного взаимодействия алюминиевого сплава АК10Ц10 с кислородом воздуха, а также указывает на неизменность общего лимитирующего механизма процесса окисления в данном температурном диапазоне [11-17].

Характер взаимного расположения анаморфоз показывает, что прямые, соответствующие сплавам с добавками бария, стабильно располагаются выше линии для исходного без добавочного состава. Это наглядно графически подтверждает численные данные табл. 1 о росте истинной скорости окисления при увеличении концентрации легирующего компонента. При этом тангенс угла наклона полученных прямых закономерно уменьшается по абсолютному значению, что напрямую коррелирует со снижением кажущейся энергии активации процесса при переходе от чистого сплава к составам с более высоким содержанием бария.

Выводы

В результате изотермического термогравиметрического анализа кинетики высокотемпературного (723-823 K) окисления литейного силумина АК10Ц10, модифицированного барием (до 1.0 масс. %), сформулированы следующие выводы:

1. **Кинематическая деструкция:** установлено, что легирование барием переводит систему в кинетически нестабильное состояние. Во всем температурном интервале наблюдается монотонный рост истинной скорости окисления до $3.31 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, сопряжённый с падением кажущейся энергии активации со 108.5 до 86.3 кДж/моль.
2. **Аррениусовская стабильность:** линейные анаморфозы в координатах $\lg K - 1/T$ и высокие коэффициенты аппроксимации полиномов 4-й степени ($R^2 > 0.97$ строго доказывают изомеханический характер гетерогенного

взаимодействия — механизм процесса не меняется, меняется лишь его энергетический барьер.

3. **Кризис сплошности (Пиллинг–Бедвортс):** физико-химический механизм интенсификации окисления обусловлен сегрегацией бария и формированием сложных гетерофазных оксидов. Из-за пространственного несоответствия кристаллических решеток и локального нарушения критерия Пиллинга–Бедвортса, сплошная барьерная пленка $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ трансформируется в дефектную, открывая каналы ускоренной объемной диффузии кислорода к матрице сплава.

Литература

1. Тарасенко Л.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Фазовый состав и механические свойства сплавов системы Al - Mg - Li – Me // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2008. – № 2. – С.40-43.
2. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2002. – № 7. – С. 24–29.
3. Антипов В.В., Лавров Н.А., Сухоиваненко В.В., Сенаторова О.Г. Опыт применения Al–Li-сплава 1441 и слоистых материалов на его основе в гидросамолётах // *Цветные металлы*. – 2013. – № 9. – С. 46-50.
4. Прач Е.Л., Михайленков К.В. Разработка нового литейного сплава системы Al–Mg–Si–Mn с добавкой лития // *Литейное производство*. – 2014. – № 7. – С. 13-15.
5. Ганиев И.Н., Акбаров Ш.С., Худойбердизода С.У., Киреев С.Ю., Саидзода М.М. Коррозионная стойкость алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дуралюмин, легированного индия, в растворе хлорида натрия // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2025. – №5 (171). – С. 64-73.

6. Коррозионно-электрохимическое поведение сплава АК7М2+0.05%Sr, легированного германием, в среде 3% раствора NaCl / С.С. Гулов, И.Н. Ганиев, Т.М. Умарова, А.Э. Бердиев // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2009. – Т. 52, № 6. – С. 460-464. – EDN OWAJZT.
7. Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Худойбердизода С.У., Джайлоев Дж.Х., Халикова Л.Р., Махмудзода М. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 типа дюралюмин, легированного празеодимом, в среде электролита NaCl // Известия высших учебных заведений. Технология лёгкой промышленности. – 2024. – Т. 69. – № 5. – С. 33-38.
8. Ганиев И.Н., Саидов М.М., Файзуллоев У.Н., Худойбердизода С.У. Потенциостатическое исследование алюминиевого сплава AM4.5Mg1 ТИПА дюралюмин с лантаном в среде водного раствора NaCl // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (161). – С. 23-33.
9. Киреев С.Ю., Синенкова С.Р., Киреева С.Н., Наумов Л.В., Козлов Г.В., Балыбердин А.С. Получение и свойства композиционных электрохимических покрытий индий-графит и никель-карбид вольфрама // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2024. – Т. 32. – № 1-2. – С. 6-12.
10. Ганиев И.Н., Саидова Ф.Р., Худойбердизода С.У., Савдуллоева С.С., Джайлоев Дж.Х., Абулхаев В.Д. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 легированного кальцием в среде электролита NaCl // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2023. – №2. – С. 37-41.
11. Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Муллоева Н.М., Тоирзода М.А. Кинетика окисления свинцово- сурьмяного сплава SSu3, легированного теллуром, в твёрдом состоянии // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2025. – № 3 (106). – С. 79-88.
12. Исмоилова М.Х., Ганиев И.Н., Отаджонов С.Э., Каюмова Ш.Б., Худойбердизода С.У. Особенности кинетики окисления на основе особо

чистого алюминия сплава АК1 с бериллием в твёрдом состоянии // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2025. – № 1 (104). – С. 83-94.

13. Ганиев И.Н., Худойбердизода С.У., Акбаров Ш.С., Сулаймони Ф.С., Киреев С.Ю. Кинетика окисления алюминиевого сплава $AlMg_{5,5}Li_{2,1}Zr_{0,15}$ типа дюралюмин с индием, в твёрдом состоянии // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2025. – № 2-3 (138). – С. 84-90.
14. Тоирзода М.А. Кинетика и механизм высокотемпературного окисления алюминиевого сплава системы $Al-Mg-Li-Zr$, легированного барием / Тоирзода М.А., Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Саидзода М.М. // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. – 2026. – Т. 1. – № 2 (55). С. 37-47.
15. Савдуллоева С.С. Влияние добавок лантана, церия и празеодима на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ типа дуралюмин / Савдуллоева С.С., Ганиев И.Н., Худойбердизода С.У., Джайлоев Д.Х., Махмудзода М., Саидзода М.М., Киреев С.Ю. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2026. – № 1 (108). – С. 67-78.
16. Сайдахмадзода Р.С. Кинетика окисления алюминиевого сплава $AM4.5Mg1$ типа дюралюмин с кальцием в твёрдом состоянии / Сайдахмадзода Р.С., Ганиев И.Н., Джайлоев Д.Х., Саидзода М.М., Киреев С.Ю., Худойбердизода С.У. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2026. – № 1 (108). – С. 79-94.
17. Тоирзода М.А. Экспериментальное исследование удельной теплоёмкости и коэффициента теплоотдачи сплава $AlMg_{5.5}Li_{2.1}Zr_{0.15}$ с барием / Тоирзода М.А., Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Саидзода М.М. // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. – 2026. – Т. 1. – № 2 (55). – С. 47-60.

ТАЪСИРИ БАРИЙ БА УСТУВОРИИ ҲАРОРАТИИ ХҶЛАИ АК10Ц10 ҲАНГОМИ ОКСИДШАВӢ

Абдулҳамиди Чама

Институти кимиёи ба номи В.И. Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Аннотатсия. Дар кор бо усули термогравиметрӣ дар шароити изотермӣ раванди оксидшавии ҳарорати баланди хӯлаи рехтагарии алюминии системаи АК10Ц10, ки бо барий модификатсия шудааст, таҳқиқ карда шудааст. Таҷрибаҳо дар муҳити ҳаво дар ҳудуди васеи ҳароратҳо бо мақсади баҳодиҳии параметрҳои кинетикӣ ва термоустувории мавод гузаронида шуданд. Муайян карда шуд, ки ворид намудани барий (то 1.0 вазн. %) ба раванди оксидшавӣ таъсири ингибиторӣ (боздорандагӣ) расонида, тағйирёбии хоси масса ва суръати ҳақиқии ҳамкориҳои хӯларо бо оксиген коҳиш медиҳад. Дар асоси қатъхатҳои кинетикӣ энергияи активатсияи зоҳирӣ ва функсияҳои термодинамикии раванд ҳисоб карда шуданд. Нишон дода шудааст, ки барий ба ташаккули сохтори оксидии зичтар ва яққинса мусоидат мекунад, ки он диффузияи ионҳоро самаранок маҳдуд намуда, термоустувории (муқовимати гармии) хӯларо баланд мебардорад. Ин ҳолат дурнамои истифодаи онро дар гиреҳҳои соиш ва қисмҳои зери фишори ҳарорат қарордоштаи мошинсозии нақлиётӣ васеъ менамояд.

Калидвожаҳо: хӯлаҳои алюминӣ, силуминҳо, хӯлаи АК10Ц10, легиронидан, барий, оксидшавии ҳарорати баланд, термогравиметрия, кинетикаи оксидшавӣ, энергияи активатсия, термоустуворӣ, пардаҳои оксидии муҳофизатӣ.

EFFECT OF BARIUM ON THE THERMAL STABILITY OF AK10Zn10ALLOY DURING OXIDATION

Abdulhamid Jama

V.I. Nikitin Chemistry Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan

Annotation. In this work, the high-temperature oxidation kinetics of the barium-modified AK10Zn10 aluminum casting alloy was investigated by thermogravimetry under isothermal conditions. The experimental studies were carried out in an air atmosphere over a wide temperature range to evaluate the kinetic parameters and thermal stability of the material. It was established that the addition of barium (up to 1.0 wt.%) exerts an inhibiting effect on the oxidation process, reducing both the specific mass change and the true rate of the alloy interaction with oxygen. Based on the kinetic curves, the apparent activation energy and thermodynamic functions of the process were calculated. It is shown

that barium promotes the formation of a denser, more homogeneous oxide structure, which effectively blocks ion diffusion and increases the scale resistance of the alloy. This expands the prospects for its application in friction nodes and thermally loaded components of transport engineering.

Keywords: *aluminum alloys, silumins, AK10Zn10 alloy, alloying, barium, high-temperature oxidation, thermogravimetry, oxidation kinetics, activation energy, thermal stability, protective oxide films.*

Сведения об авторе: Абдулхамиди Джама - соискатель Института химии имени В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана. **Адрес:** 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Айни 299/2. **Тел.:** (+992 04) 391 91 91. **E-mail:** nematovbehruzcon37@gmail.com.

Маълумот дар бораи муаллиф: Абдулхамиди Чама – унвонҷӯи Институти кимиёи ба номи В.И. Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон. **Суроға:** 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Айни 299/2. **Тел.:** (+992 04) 391 91 91. **E-mail:** nematovbehruzcon37@gmail.com.

Information about the author: Abdulhamid Jama — applicant of the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan. **Address:** Aini Ave., 299/2, Dushanbe, Tajikistan, 734063. **Phone:** (+992 04) 391 91 91. **E-mail:** nematovbehruzcon37@gmail.com.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОАГУЛЯЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СМЕСИ АЛЮМО-ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ КОАГУЛЯНТОВ

Аслонзода А.А.¹, Наймов Н.А.², Рафиев Р.С.¹, Ахмадшоев И.Ш.²

Таджикский национальный университет¹

Научно-исследовательский институт металлургии ОАО

«Таджикская алюминиевая компания»²

Аннотация. В работе представлены результаты лабораторных и полупромышленных исследований по получению и оценке коагуляционной способности алюмо-железосодержащих коагулянтов, синтезированных из каолиновых глин месторождения «Чашма-Санг» и смеси гидроксидов алюминия и железа. Проведены процессы сульфатизации и гидрометаллургической переработки, обеспечившие получение очищенного продукта с высоким уровнем чистоты (нерастворимый остаток менее 0.01 %). Лабораторные испытания подтвердили эффективность коагулянтов: степень удаления взвешенных веществ по показателю мутности превышает 93 %. Сравнительный анализ показал соответствие основных характеристик требованиям ГОСТ 12966-75 и частично ГОСТ 5155-74, за исключением повышенного содержания оксида железа, обусловленного природными особенностями сырья. Экономическая оценка выявила значительные преимущества: снижение расхода реагента, уменьшение эксплуатационных затрат, использование местной сырьевой базы и повышение срока службы оборудования. Полученные результаты подтверждают перспективность применения алюмо-железосодержащих коагулянтов для систем водоподготовки в Республике Таджикистан, что имеет важное значение для устойчивого развития, экологической безопасности и импортозамещения в химической промышленности.

Ключевые слова: алюмо-железосодержащий коагулянт, каолиновые глины, сульфатизация, аммонизация, гидроксиды алюминия и железа, коагуляционная способность, очистка питьевой воды, физико-химический анализ.

Введение

Очистка питьевой воды остаётся одной из ключевых задач устойчивого развития и экологической безопасности. Традиционно для процессов коагуляции

применяются соли алюминия и железа, однако их эффективность и экологические последствия активно изучаются в последние годы.

В работе Boudjema и соавторов [1] продемонстрирована результативность электрохимической коагуляции с использованием алюминиевых и железных электродов, где степень снижения мутности достигала 99 %.

Новые направления исследований связаны с синтезом полимерных алюмо-железосодержащих коагулянтов из техногенных отходов. В частности, в статье [2] описан процесс получения полимерного алюмо-ферритного сульфата из красного шлама, показавший высокую эффективность флокуляции.

Кроме того, в исследовании [3] отмечены различия в активационных механизмах алюминиевых и железных коагулянтов в системах с перуксусной кислотой, что имеет значение для контроля устойчивости микроорганизмов и антибиотикорезистентности.

Одним из самых распространённых коагулянтов для осветления и подготовки питьевой воды является сульфат алюминия [4-7], который традиционно получают из бокситсодержащих и других глиноземсодержащих руд Байеровским способом [8].

В настоящее время в нашей республике налажена технология получения коагулянта из гидроксида алюминия и серной кислоты традиционным методом [9]. Однако со временем, из-за истощения запасов бокситов, увеличивается стоимость гидроксида алюминия, что делает данную технологию менее эффективной. Таджикистан, однако, обладает значительным потенциалом благодаря наличию месторождений низкокачественных глиноземсодержащих руд, таких как каолиновые глины месторождения «Зидди» и «Чашма-Санг», мусковит-ставролитовые сланцы «Курговад», нефелиновые сиениты «Турпи» и др., которые могут быть рационально использованы для получения коагулянтов [10, 11].

Таким образом, **актуальность и цель** настоящей работы определяется необходимостью комплексного изучения физико-химических свойств алюмо-железосодержащих коагулянтов, полученных из каолиновых глин

месторождения «Чашма-Санг» и смеси гидроксидов алюминия и железа, их соответствия нормативным требованиям, а также оценки экономических и экологических преимуществ для систем водоподготовки Республики Таджикистан.

Методы исследования

Исходя из этого, в период с 24 июля по 1 августа 2024 года было проведено процесс сульфатизации 1000 кг каолиновой глины с использованием около 900 кг серной кислоты, в результате чего получено приблизительно 1800 кг сульфатизированного продукта (неочищенного коагулянта). Сам процесс сульфатизации осуществлялся при температуре 240-280 °С и продолжался 90 минут.

Далее, в период с 10 по 15 июля 2025 года были проведены полупромышленные испытания по гидрометаллургической переработке 800 кг сульфатизированного продукта с целью получения очищенного алюмо-железосодержащего коагулянта. Водная обработка осуществлялась в защищённом стальном реакторе, оснащённом парогенератором и электрическим мешалкой, при температуре 75-85 °С, продолжительностью 60 минут и соотношении твёрдое : жидкое = 1 : 3.

В результате было получено около 3 м³ жидкого раствора коагулянта, который в период с 17 по 31 июля 2025 года подвергался кристаллизации в цехе по производству строительных и огнеупорных материалов ОАО «Таджикская Алюминиевая Компания» с использованием утилизируемого тепла туннельной печи. В итоге произведено приблизительно 600 кг очищенного алюмо-железосодержащего коагулянта.

Из полученного коагулянта была отобрана проба, подвергнутая физико-химическим анализам. По внешнему виду образец представляет собой разнородные куски белого цвета с сероватым оттенком (рисунок).



Рисунок. Внешний вид кристалла алюмо-железосодержащего коагулянта

Испытания проводились в лаборатории Центрального контроля производства питьевой воды ГУП «Душанбеводоканал» по стандартной методике в период с 13 по 16 апреля 2026 года.

Для оценки эффективности полученного коагулянта были выполнены физико-химические испытания. Сравнительные показатели приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика физико-химических показателей экспериментального алюмо-железистого коагулянта и используемых коагулянтов

Показатели	Вид коагулянта					
	сульфат алюминия очищенный (ГОСТ 12966-75)			сульфат алюминия, неочищенный (ГОСТ 5155-74)		алюмо- железистый коагулянт из каолинов
	Нормативное содержание для сорта, %					
	Высший	I	II	A	B	
Al ₂ O ₃ , не менее	16.3	15.0	14.0	9.5	9.5	15.1
H ₂ SO ₄ свободная, не более	0	0.05	0.1	2.0	3.0	0
Fe (в пересчете на Fe ₂ O ₃), не более	0.002	0.04	0.7	0.5	0.9	3.5

As (в пересчете на As_2O_3), не более	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001
Нерастворимый в воде остаток по отношению к оксиду алюминия (н.о. $/Al_2O_3$), не более	-	-	-	2.2	2.7	0.004
Доза коагулянта, мг/л	18.28	19.80	21.28	31.36	31.36	20.75

Обсуждение результатов

Согласно данным таблицы 1, содержание оксида железа (Fe_2O_3) в экспериментальном коагулянте составляет 3,5 %, что превышает нормативные значения, установленные для алюминиевых коагулянтов. Другие показатели, включая содержание Al_2O_3 (15,1 %), соответствуют требованиям ГОСТ 12966-75. Низкий уровень нерастворимого остатка (0,004 %) свидетельствует о высокой чистоте продукта. По результатам лабораторных испытаний эффективность удаления взвешенных веществ по показателю «мутность» превысила 93 %. На основании проведённых исследований был утвержден акт от 22 апреля 2026 года.

Также, из смеси гидроксидов алюминия и железа традиционным методом был получен опытный образец алюмо-железосодержащего коагулянта, для которого также проведено исследование его коагуляционной способности.

Важно отметить, что смесь гидроксидов алюминия и железа в своё время была получена при аммиачной переработке растворов сульфатов алюминия и железа, образовавшихся при сульфатизации каолиновых глин месторождения «Чашма-Санг» [12, 13]. Состав смеси гидроксидов включал 85 % гидроксида алюминия и 14 % гидроксида железа (III). По внешнему виду образец коагулянта представляет собой пластинки серовато-белого цвета.

Исследования также проводились в лаборатории Центра контроля производства питьевой воды при ГУП «Душанбеводоканал» по стандартной методике в период с 13 по 16 апреля 2026 года.

В таблице 2 приведены показатели эффективности алюмо-железосодержащего коагулянта в сравнении с характеристиками коагулянтов, применяемых для очистки воды.

Таблица 2. Сравнительная характеристика физико-химических показателей экспериментального алюмо-железистого коагулянта и используемых коагулянтов

Показатели	Вид коагулянта					
	Сульфат алюминия очищенный (ГОСТ 12966-75)			Сульфат алюминия, неочищенный (ГОСТ 5155-74)		Смешанный алюмо- железистый коагулянт
	Нормативное содержание для сорта, %					
	Высший	I	II	A	B	
Al ₂ O ₃ , не менее	16.3	15.0	14.0	9.5	9.5	14.8
H ₂ SO ₄ свободная, не более	0	0.05	0.1	2.0	3.0	0.1
Fe (в пересчете на Fe ₂ O ₃), не более	0.002	0.04	0.7	0.5	0.9	3.6
As (в пересчете на As ₂ O ₃), не более	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001
нерастворимый в воде остаток по отношению к оксиду алюминия (н.о. /Al ₂ O ₃), не более	-	-	-	2.2	2.7	0.07
доза коагулянта, мг/л	18.28	19.80	21.28	31.36	31.36	20.4

Согласно данным таблицы 2, содержание оксида железа (Fe_2O_3) в экспериментальном алюмо-железистом коагулянте составляет 3,6%, что превышает нормативные значения для алюминиевых коагулянтов. Однако, по литературным данным [14-16], в последние годы разрабатываются технологии получения коагулянтов с повышенным содержанием железа, подтверждающие эффективность применения смешанных алюмо-железистых реагентов,

поскольку сульфат железа (III) выполняет аналогичную коагуляционную функцию, что и сульфат алюминия при водоподготовке. Высокое содержание железа в данном случае обусловлено его значительным присутствием в каолиновых глинах месторождения «Чашма-Санг» (более 6%) [13]. В диссертационной работе Х. Сафиева показана эффективность коагулянтов, полученных при сернокислотной обработке высокожелезистых бокситов, где содержание Fe_2O_3 превышает 11% [17]. При этом имеется возможность регулирования содержания железа в составе смешанного коагулянта.

Кроме того, остальные физико-химические показатели, в частности содержание Al_2O_3 (14.8%), соответствуют требованиям ГОСТ 12966-75 (сульфат алюминия очищенный) и частично ГОСТ 5155-74 (сульфат алюминия неочищенный). По результатам лабораторных испытаний эффективность осаждения мелких твердых частиц увеличилась, что способствовало снижению мутности воды; показатель составил более 95%, что подтверждает высокую практическую ценность полученного коагулянта.

Использование данных коагулянтов обладает значительным экономическим потенциалом:

- *Снижение дозы реагента* (20 мг/л по сравнению с 31,36 мг/л для неочищенного сульфата алюминия) позволяет уменьшить расход химических веществ и сократить эксплуатационные затраты.
- *Высокая чистота продукта* (нерастворимый остаток менее 0,01 %) снижает нагрузку на фильтры и оборудование, способствуя увеличению срока их службы.
- *Использование местной сырьевой базы* (каолиновые глины месторождения «Чашма-Санг») уменьшает зависимость от импортных реагентов и способствует развитию национальной промышленности.
- *Высокая эффективность очистки* (осаждение взвешенных частиц более 93 %) обеспечивает улучшение качества питьевой воды при меньших затратах на дополнительную обработку.

Выводы

Использование алюмо-железосодержащего коагулянта, полученного из каолиновых глин, подтверждает эффективность технологии и демонстрирует положительные перспективы с точки зрения экономической выгоды, экологической значимости и устойчивого развития системы водоподготовки в Республике Таджикистан.

Экспериментальные алюмо-железосодержащие коагулянты, синтезированные из каолиновых глин месторождения «Чашма-Санг» и смеси гидроксидов алюминия и железа, за исключением показателя содержания оксида железа, соответствуют требованиям ГОСТ 12966-75 и частично ГОСТ 5155-74. Повышенное содержание железа объясняется природными особенностями исходного сырья и подтверждается литературными данными о возможности эффективного применения смешанных коагулянтов.

Литература

1. Boudjema, N. Treatment of contaminated river water by batch electrocoagulation system using aluminium and iron electrodes: Performance of process and statistical analysis / Boudjema, N., Salem, D.B., Lobna, E. *et al.* // *Water Air Soil Pollut* **235**, 680 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07495-6>.
2. Zhen, Z. A Novel Method of Synthesizing Polymeric Aluminum Ferric Sulfate Flocculant and Preparing Red Mud-Based Ceramsite / Zhen, Z.; He, C.; Wang, Y.; Ma, H. // *Materials* **2024**, *17*, 1239. <https://doi.org/10.3390/ma17061239>.
3. Li, Hu. Divergent activation pathways of iron- and aluminum-based coagulants in peracetic acid systems: Implications for antibiotic resistance control / Li, Hu & Zhang, Wenhui & Sun, Peng & Hu, Zhiyi & Guo, He & Wang, Zhanhui & Zhang, Jiajia & Wang, Tiecheng // *Chemical Engineering Journal*. 2026, Vol. 535. – P.175605. [10.1016/j.cej.2026.175605](https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.175605).
4. Koohestanian, A. The Separation Method for Removing of Colloidal Particles from Raw Water / A. Koohestanian, M. Hosseini, Z. Abbasian. // *American-Eurasian*

- Journal of Agriculture and Enviromental Science. 2008. Vol. 4. No. 2. – P. 266-273.
5. Ismail, A.K. Energy saving during alum production from kaolin with coproduction of alumina-silica composites from process silica wastes // Mineral Processing Technology. 2010. – P. 781-787.
 6. Arnoldsson, E. Assessment of drinking water treatment using Moringa oleifera natural coagulant / E. Arnoldsson, M. Bergman, N. Matsinhe, K.M. Persson // Vatten. Vol. 64. – 2008. – P. 137-150.
 7. Apostol, G. Optimization of coagulation-flocculation process with aluminum sulfate based on response surface methodology // G. Apostol, R. Kouachi, I. Constantinescu // UPB Scientific Bulletin. Vol. 73. No. 2. 2011 – P. 1454-2331.
 8. Pehlivan, A. Alumina extraction from low grade diasporic bauxite by pyro-hydro metallurgical Process / A. Pehlivan, A. O. Aydin, A. Alp // SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. Vol. 16. No. 2. 2012. – P. 92-987.
 9. Надиров Б. Как "ТАЛКО Кемикал" помогает "Душанбеводоканалу" очищать питьевую воду/ Бахманер Надиров // Азия плюс. 21 октября, 2019. <https://www.asiaplustj.info/ru/news/tajikistan/society/20191021/kak-talko-kemikal-pomogaet-dushanbevodokanalu-ochitshat-pitevuyu-vodu>.
 10. Ёров, З.Ё. Минерально – сырьевая база химико – металлургической промышленности Таджикистана / З.Ё. Ёров, Ш.О. Кабиров, А. Муродиён, Н. М. Сироджев. – Душанбе, 2012. – Отп. в «Мега Басым», Стамбул, Турция. – 416 с.
 11. Наимов, Н.А. Выпуск опытной партии неочищенного и очищенного коагулянта из каолиновых глин месторождения «Чашма-Санг» сульфатизацией / Н.А. Наимов, У. Мирсаидов, Дж.Р. Рузиев, А. Муродиён, Х.А. Мирпочаев, Х. Сафиев // Вестник технологического университета. – 2024. – Т.27. – №2. – С. 50-56.
 12. Аслонов, А.А. Технология обработки сульфатсодержащего раствора гидроксидом аммония / Аслонов А.А., Наимов Н.А., Аминджони Г., Холов

- К.Ш., Рафиев Р.С. // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2025. – №2. – С. 213-221.
13. Аслонов, А.А. Аммиачная технология переработки сульфатсодержащего раствора, при сульфатизации каолиновых глин/ А.А. Аслонов, Н.А. Наимов, Г. Аминджони, К.Ш.Холов, Р.С.Рафиев // Вестник технологического университета. – 2025. – Т. 28. – №6. – С. 65-70. DOI 10.5542/3034–4689_2025_28_6_65
14. Патент РФ. Способ получения алюможелезного коагулянта. RU 2 264 352, С 01 F 7/00, С 02 F 1/52, опубликовано: 20.11.2005. Бюл. №32.
15. Свергузова, С.В. Получение железосодержащего коагулянта для очистки сточных вод от органических взвесей // С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова, Л.А. Порожнюк, А.В. Святченко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т.18. – № 5(2). – С. 362-366.
16. Наимов, Н.А. Технология получения коагулянтов из каолиновых глин месторождения «Зидди» способом сульфатизации // Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2021. – Т. 64. – № 9-10. – С. 571-578.
17. Сафиев Х. Исследование и разработка сернокислотных способов получения коагулянтов из высокожелезистых бокситов / Дис... канд. техн. наук. — Киев, 1976. – 154с.

ТАҲҚИҚИ ЛАБОРАТОРИИ ҚОБИЛИЯТИ КОАГУЛЯТСИОНИИ ОМЕХТАИ КОАГУЛЯНТҲОИ АЛЮМИНИУ ОҲАНДОР

Аслонзода А.А.¹, Наимов Н.А.², Рафиев Р.С.¹, Ахмадшоев И.Ш.²

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон¹

Пажӯишгоҳи илмию таҳқиқоти металлургия-и ҶСК «Ширкати Алюминийи Тоҷик»²

Аннотатсия. Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқоти лабораторӣ ва нимсаноатӣ оид ба ҳосил ва арзёбии қобилияти коагулятсионии коагулянтҳои алюминию оҳандор, ки аз гилҳои каолинии кони «Чашма-Санг» ва омехтаи гидроксидҳои алюминий ва оҳан синтез шудаанд, пешниҳод мегарданд. Равандҳои сульфатизатсия ва коркарди гидрометаллургӣ гузаронида шуда,

маҳсулоти тоза бо дараҷаи баланди покӣ (боқимондаи ҳалнашаванда камтар аз 0,01 %) ба даст оварда шуд. Озмоишҳои лабораторӣ самаранокии коагулянтҳоро тасдиқ намуд: дараҷаи бартарафсозии моддаҳои муаллақ аз рӯйи нишондиҳандаи «тирагӣ» зиёда аз 93 % мебошад. Таҳлили муқоисавӣ нишон дод, ки хосиятҳои асосӣ ба талаботи СД 12966-75 ва қисман ба СД 5155-74 мутобиқат мекунанд, ба истиснои миқдори баландтари оксиди оҳан, ки бо хусусиятҳои табиӣи ашёи хом шарҳ дода мешавад. Арзёбии иқтисодӣ бартариҳои назаррасро ошкор намуд: кам шудани масрафи реагент, коҳиши хароҷоти амалиётӣ, истифодаи пойгоҳи ашёи хоми маҳаллӣ ва дароз шудани муҳлати хизматрасониӣ таҷҳизот. Натиҷаҳои бадастомада дурнамои мусбати истифодаи коагулянтҳои алюминию оҳандорро барои системаҳои обтаъйёркунӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон тасдиқ менамоянд, ки дорои аҳамияти муҳим барои рушди устувор, амнияти экологӣ ва иваз намудани воридот дар саноати химиявӣ мебошад.

Калидвожаҳо: коагулянти алюминию оҳандор, гилҳои каолинӣ, сулфаткунонӣ, аммонизатсия, гидроксидҳои алюминий ва оҳан, қобилияти коагулятсионӣ, тозакунии оби нӯшокӣ, таҳлили физикию химиявӣ.

LABORATORY STUDY OF THE COAGULATION ABILITY OF ALUMINUM-IRON COAGULANT MIXTURES

A.A. Aslonzoda¹, N.A. Naimov², R.S. Rafiev¹, I.Sh. Ahmadshoev²

Tajik National University¹

Research Institute of Metallurgy of JSC “Tajik Aluminum Company”²

Annotation. This study presents the results of laboratory and semi-industrial investigations on the synthesis and evaluation of the coagulation efficiency of aluminum-iron coagulants obtained from kaolinite clays of the “Chashma-Sang” deposit and mixtures of aluminum and iron hydroxides. Sulfatization and hydrometallurgical processing were carried out, resulting in a purified product with a high degree of purity (insoluble residue less than 0.01%). Laboratory tests confirmed the effectiveness of the coagulants: the removal efficiency of suspended solids, measured by turbidity, exceeded 93%. Comparative analysis demonstrated that the main characteristics comply with the requirements of GOST 12966-75 and partially with GOST 5155-74, except for the elevated iron oxide content, which is explained by the natural properties of the raw material and supported by literature data on the effective use of mixed coagulants. Economic evaluation revealed significant advantages, including reduced reagent consumption, lower operational costs, utilization of local raw material resources, and extended service life of equipment. The obtained results confirm the promising

application of aluminum-iron coagulants in water treatment systems of the Republic of Tajikistan, which is of great importance for sustainable development, environmental safety, and import substitution in the chemical industry.

Keywords: *aluminum-iron coagulant, kaolinite clays, sulfatization, ammoniation, aluminum and iron hydroxides, coagulation efficiency, drinking water treatment, physicochemical analysis.*

Сведения об авторах: **Аслонзода Азимджон Абдулхусайн** – докторант PhD по специальности «Химическая технология неорганических веществ» факультета химии, кафедра прикладной химии Таджикского национального университета. **Адрес:** 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17. **Тел.:** (+992 93) 532 97 97. **E-mail:** aslonov04061997@mail.ru.

Наимов Носир Абдурахмонович – д.т.н., директор ГУ «Научно-исследовательский институт металлургии» ОАО «Таджикская Алюминиевая Компания». **Адрес:** 734003, г. Душанбе, ул. Х. Хакимзаде, 17. **Тел.:** (+992 90) 111 65 12. **E-mail:** nosser2016@outlook.com.

Рафиев Рустам Сафаралиевич – к.х.н., заведующий кафедрой прикладной химии химического факультета Таджикского национального университета. **Адрес:** 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17. **Тел.:** (+992 93) 906 69 59. **E-mail:** rustam.rafiiev@mail.ru.

Ахмадшоев Иброхим Шарифович – к.т.н., заместитель директора по внедрению, главный инженер Научно-исследовательского института металлургии ОАО «Таджикская Алюминиевая Компания». **Адрес:** 734003, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Х. Хакимзаде, 17. **Тел.:** (+992 17) 22 26 26. **E-mail:** ibrohim.ahmadshoev@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллифон: **Аслонзода Азимҷон Абдулхусайн** – докторанти PhD дар риштаи “Технологияи химиявии моддаҳои ғайриорганикӣ” дар факултети химия, кафедраи химияи татбиқӣ, Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. **Суроға:** 734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Рӯдакӣ, 17. **Тел.:** (+992 93) 532-97-97, **E-mail:** aslonov04061997@mail.ru.

Наимов Носир Абдурахмонович – д.и.т., директори Муассисаи давлатии “Пажӯҳишгоҳи илмию таҳқиқотии металлургия»-и ҶСК «Ширкати Алюминийи Тоҷик». **Суроға:** 734003, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Х. Ҳақимзода, 17. **Тел.:** (+992 90) 111 65 12, **E-mail:** nosser2016@outlook.com.

Рафиев Рустам Сафаралиевич – н.и.х., мудири кафедраи химияи татбиқӣ, факултети химия, Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. **Суроға:** 734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Рӯдакӣ, 17. **Тел.:** (+992 93) 906 69 59. **E-mail:** rustam.rafiiev@mail.ru.

Аҳмадшоев Иброҳим Шарифович – н.и.т., муовини директор оид ба татбиқ – сармуҳандиси Муассисаи давлатии “Пажӯҳишгоҳи илмию таҳқиқотии металлургия»-и ҶСК «Ширкати Алюминийи Тоҷик». **Суроға:** 734003, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Ҳ. Ҳакимзода, 17. **Тел.:** (+992 17) 22 26 26. **E-mail:** ibrohim.ahmadshoev@mail.ru

Information about the authors: Aslonzoda Azimjon Abdulhusain – PhD candidate in Chemical Technology of Inorganic Substances, Faculty of Chemistry, Department of Applied Chemistry, Tajik National University. **Address:** Rudaki Ave. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 93) 532 97 97. **E-mail:** aslonov04061997@mail.ru.

Naimov Nosir Abdurahmonovich – DSc in Tech. (engineering), Director of State Institution “Research Institute of Metallurgy” of JSC “Tajik Aluminum Company”. **Address:** H. Hakimzoda St., 17, Dushanbe, Tajikistan, 734003 **Phone:** (+992 90) 111 65 12. **E-mail:** nosser2016@outlook.com.

Rafiev Rustam Safaralievich – Cand. Sc. in Chem., Head of the Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, Tajik National University. **Address:** Rudaki Ave. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 93) 906 69 59. **E-mail:** rustam.rafiev@mail.ru.

Ahmadshoev Ibrohim Sharifovich – Cand. Sc. in Tech., Deputy Director for Implementation – Chief Engineer of the State Institution “Research Institute of Metallurgy” of JSC “Tajik Aluminum Company”. **Address:** H. Hakimzoda Str. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734003. **Phone:** (+992 17) 22 26 26. **E-mail:** ibrohim.ahmadshoev@mail.ru

ВЛИЯНИЕ НАТРИЯ НА ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ СПЛАВА $ZnAlNi_{0.5}$ В ТВЁРДОМ СОСТОЯНИИ

Ганиев И.Н.¹, Алиева Л.З.², Муродализода У.М.³, Саидзода М.М.²

Институт химии имени В.И. Никитина

Национальной академии наук Таджикистана¹

*«Академия туризма» Международного университета туризма и
предпринимательства Таджикистана²*

Дангаринский государственный университет³

***Аннотация.** В работе методом высокотемпературной термогравиметрии комплексно изучено влияние натрия в интервале концентраций 0.05–1.0 масс. % на кинетику высокотемпературного окисления цинкового сплава марки $ZnAlNi_{0.5}$ в твёрдом состоянии. Экспериментальные исследования проводились на воздушной среде в интервале температур 523, 573 и 623 К. Установлено, что процесс взаимодействия исследуемых сплавов с кислородом воздуха протекает во времени по параболическому закону. Показано, что легирование натрием интенсифицирует процесс окисления: с увеличением концентрации натрия от 0 до 1.0 масс. % истинная скорость окисления возрастает (например, при 523 К с $2.45 \cdot 10^{-4}$ до $3.04 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻²·с⁻¹). При этом наблюдается закономерное снижение кажущейся энергии активации процесса окисления со 129.0 до 115.4 кДж/моль, что свидетельствует о снижении термической стабильности защитной оксидной пленки при введении модификатора.*

***Ключевые слова:** цинковые сплавы, система $Zn-Al-Ni$, натрий, кинетика окисления, термогравиметрия, истинная скорость окисления, кажущаяся энергия активации.*

Введение

Современное развитие авиационной, автомобильной и электротехнической промышленности диктует потребность в создании новых конструкционных материалов, сочетающих в себе высокие физико-механические и технологические свойства с повышенной коррозионной и термической стабильностью. Традиционные сплавы на основе цинка широко востребованы в качестве защитных покрытий и конструкционных элементов, однако их

эксплуатационный ресурс в условиях высокотемпературного воздействия часто ограничен из-за интенсивных процессов газовой коррозии. В связи с этим актуальной задачей современного металловедения является поиск эффективных путей модифицирования структуры цинковых материалов для управления кинетикой их взаимодействия с окислительными средами [1].

Цинковые сплавы системы Zn–Al–Ni отличающиеся высокими эксплуатационными характеристиками, которые, однако, ограничиваются процессами высокотемпературного окисления. Изучение кинетики взаимодействия твердых сплавов с кислородом необходимо для прогнозирования их долговечности и понимания механизмов деградации структуры.

Микролегирование щелочными металлами, в частности натрием, представляет собой эффективный метод изменения термодинамических параметров и диффузионных процессов на границе «металл–газ», но влияние малых концентраций натрия на сплав ZnAl1Ni0.5 изучено недостаточно. Настоящая работа исследует влияние добавок натрия (0.05–1.0 масс. %) на кинетические параметры и термостабильность окисления сплава ZnAl1Ni0.5 в твёрдом состоянии с использованием термогравиметрии.

В роли эффективного модификатора особый интерес представляет натрий — активный щелочной металл с высокой диффузионной подвижностью. Его малые добавки способны существенно трансформировать кристаллическую структуру поверхностных слоев и скорректировать термодинамические факторы роста защитной оксидной пленки. Несмотря на широкое мировое применение натрия для легирования различных цветных сплавов, его непосредственное воздействие на кинетику окисления сложнолегированных цинковых композиций системы Zn–Al–Ni ранее детально не рассматривалось.

Актуальность изучения данной системы определяется необходимостью выявления механизмов зарождения и роста оксидных слоев при термическом нагружении. Общая жаростойкость исследуемого материала напрямую зависит от интенсивности диффузии ионов металлов и кислорода через гетерофазную

границу раздела. Расчет фундаментальных кинетических характеристик — истинной скорости окисления и кажущейся энергии активации — дает возможность раскрыть физико-химическую сущность протекающих явлений и математически формализовать поведение сплава с позиций классической химической кинетики [5-7].

Настоящая работа направлена на экспериментальное определение влияния малых добавок натрия (в диапазоне 0.05–1.0 масс. %) на кинетические параметры высокотемпературного окисления цинкового сплава $ZnAl_{11}Ni_{0.5}$ в твёрдом состоянии. Исследование реализуется методом непрерывной термогравиметрии в воздушной атмосфере при температурах 523, 573 и 623 К. Ожидаемые результаты призваны установить количественные корреляции между содержанием легирующего элемента и жаростойкостью матричного сплава, создавая научно-практический базис для разработки термически стабильных материалов в машиностроении [8-12].

Материалы и методика исследования

Синтез исследуемых сплавов осуществляли в шахтной лабораторной электропечи сопротивления типа СШОЛ в интервале температур 650–700 °С. Исходными компонентами шихты служили цинк марки Ц2 (ГОСТ 3640-94), алюминий А7 (ГОСТ 11069-2001), никель Н1 (ГОСТ 849-2018) и металлический натрий (ГОСТ 3273-75). Базовый цинковый сплав состава $ZnAl_{11}Ni_{0.5}$ легировали натрием в концентрациях 0.05, 0.1, 0.5 и 1.0 масс. %. Дозирование компонентов выполняли на аналитических весах Electronic Balance с погрешностью не более 0.2 мг. При расчёте состава шихты закладывался технологический коэффициент на угар металлов при плавке [13-15].

Результаты термогравиметрического исследования кинетики окисления цинкового сплава $ZnAl_{11}Ni_{0.5}$, легированного натрием, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплава ZnAl1Ni0.5 с натрием в твёрдом состоянии

Содержание натрия в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Кажущаяся энергия активации,
0.0	523	2.45	129.0
	573	2.94	
0.05	523	2.64	123.5
	573	3.10	
0.1	523	2.70	120.0
	573	3.28	
0.5	523	2.89	118.0
	573	3.45	
1.0	523	3.04	115.4
	573	3.60	
	623	3.90	

Из представленных данных видно, что истинная скорость окисления сплавов закономерно возрастает как с повышением температуры, так и по мере увеличения концентрации модификатора в интервале 0.05–1.0 масс. %. Так, для исходного безнатриевого сплава в температурном интервале 523–623 К скорость окисления изменяется в пределах от $2.45 \cdot 10^{-4}$ до $3.21 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В то же время для сплава, содержащего 1.0 масс. % натрия, данный показатель достигает значений $3.04 \cdot 10^{-4} \div 3.90 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при аналогичных температурных условиях.

Кажущаяся энергия активации процесса окисления исследуемых композиций при этом снижается от 129.0 кДж/моль (для базового сплава) до 115.4 кДж/моль (для модифицированного образца). Кинетические и энергетические параметры высокотемпературного взаимодействия металлов с кислородом воздуха тесно связаны со структурно-фазовыми особенностями формирующейся оксидной

пленки. Рост скорости окисления и падение энергии активации при введении натрия свидетельствуют о том, что образующаяся на поверхности образцов окалина приобретает более рыхлую, дефектную или гетерофазную структуру. Это существенно облегчает диффузионный транспорт ионов кислорода к границе раздела фаз, ускоряя газовую коррозию модифицированных сплавов [16-19].

Из представленных в таблице 1 данных отчетливо прослеживается влияние как температуры, так и концентрации модификатора на кинетические параметры взаимодействия сплавов с кислородом воздуха. С ростом температуры от 523 до 623 К для всех исследованных составов закономерно увеличивается истинная скорость окисления, что согласуется с классическими представлениями химической кинетики о температурной зависимости скорости гетерогенных реакций. Однако введение натрия оказывает негативное влияние на жаростойкость базовой композиции: при фиксированной температуре переход от немодифицированного сплава к сплаву, содержащему 1.0 масс. % Na, сопровождается ростом скорости окисления во всем изученном интервале. Соответствующее снижение кажущейся энергии активации (с 129.0 до 115.4 кДж/моль) указывает на существенное облегчение диффузионных процессов на межфазной границе «металл–газ», вызванное, по-видимому, разрыхлением структуры защитного оксидного слоя высокоактивными ионами щелочного металла.

В качестве примера на рисунке 1 приведены кинетические кривые окисления, характеризующие изменение удельной массы во времени для цинкового сплава $ZnAl1Ni0.5$, содержащего 0.05 и 1.0 масс. % натрия, при температурах 523-623К.

Характер полученных кривых показывает, что процесс взаимодействия сплавов с кислородом воздуха протекает в диффузионном режиме.

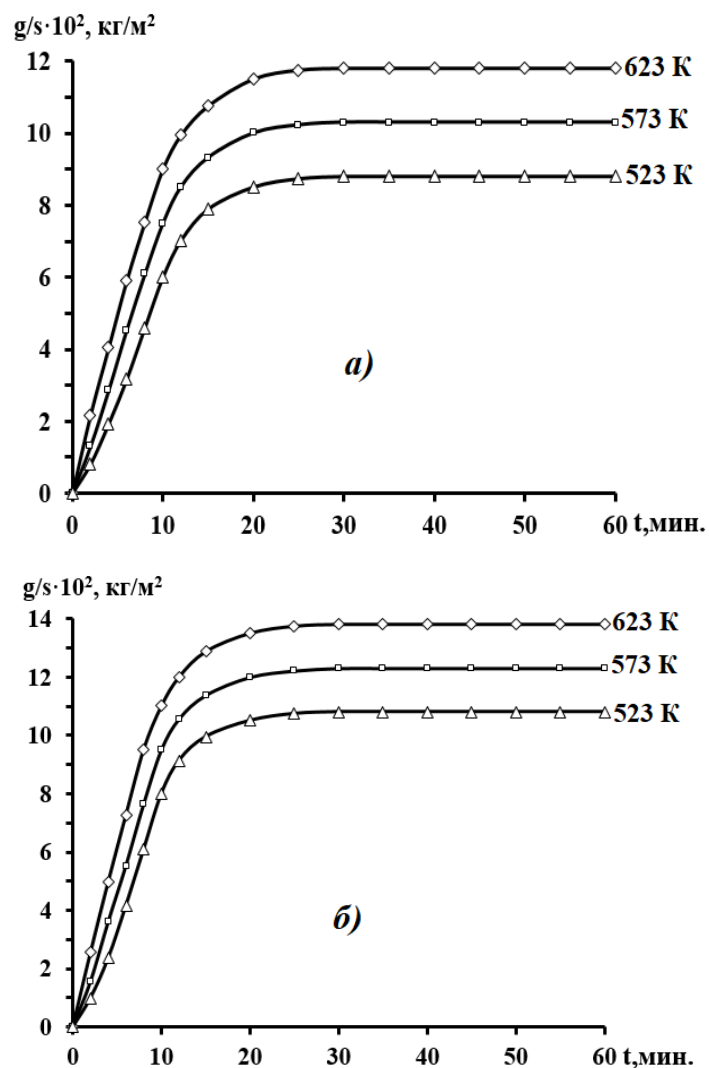


Рисунок 1. Кинетические кривые окисления сплава ZnAl1Ni0.5 (а) с натрием (масс. %): 0.05 (б)

Наиболее интенсивное поглощение кислорода фиксируется на начальном этапе термостатирования, после чего скорость процесса постепенно стабилизируется, что обусловлено ростом толщины и фазовой перестройкой формирующегося поверхностного оксидного слоя.

На кривых поглощения кислорода (рис. 1) отчётливо видно отсутствие линейного участка, характерного для образования рыхлых оксидов. Плавный, затухающий изгиб кинетических зависимостей во всем исследованном интервале температур свидетельствует о непрерывном формировании плотного защитного слоя на поверхности образцов, который со временем начинает оказывать существенное диффузионное сопротивление. Сравнение кривых для

немодифицированной композиции (рис. 1, *а*) и сплава с добавлением 0.05 масс. % Na (рис. 1, *б*) показывает, что введение щелочного металла смещает кривые в область более высоких значений удельного прироста массы. Данный факт подтверждает интенсифицирующее влияние натрия на процесс высокотемпературного взаимодействия и хорошо согласуется с расчетными значениями констант скоростей, приведёнными далее в таблице 1.

Прежде всего, экспериментальные данные показывают, что с ростом температуры скорость окисления исследуемых сплавов закономерно возрастает. Добавление натрия снижает кажущуюся энергию активации процесса твердофазного окисления цинковой матрицы (со 129.0 до 115.4 кДж/моль). При этом константы истинной скорости окисления сплава $ZnAl1Ni0.5$ при фиксированных температурах последовательно увеличиваются по мере роста концентрации лития от 0.05 до 1.0 масс. % по сравнению с исходным нелегированным образцом.

Зависимость удельного прироста массы исследуемых образцов от концентрации модификатора при фиксированном времени экспозиции (изохроны окисления) для температур 523 и 623 К приведена на рисунке 2. На представленных графиках чётко прослеживается общая тенденция к интенсификации процессов газовой коррозии по мере увеличения содержания натрия до 1.0 масс. %. Полученный характер зависимостей находится в полном соответствии со снижением энергетического барьера (кажущейся энергии активации) химического взаимодействия, зафиксированным для данных условий.

Температурная зависимость константы скорости окисления исследуемых сплавов в аррениусовских координатах $\lg K - 1/T$ представлена на рисунке 3.

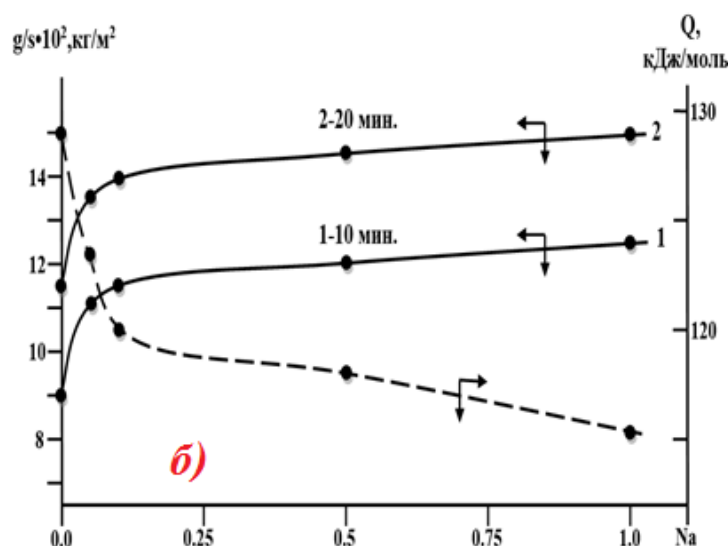
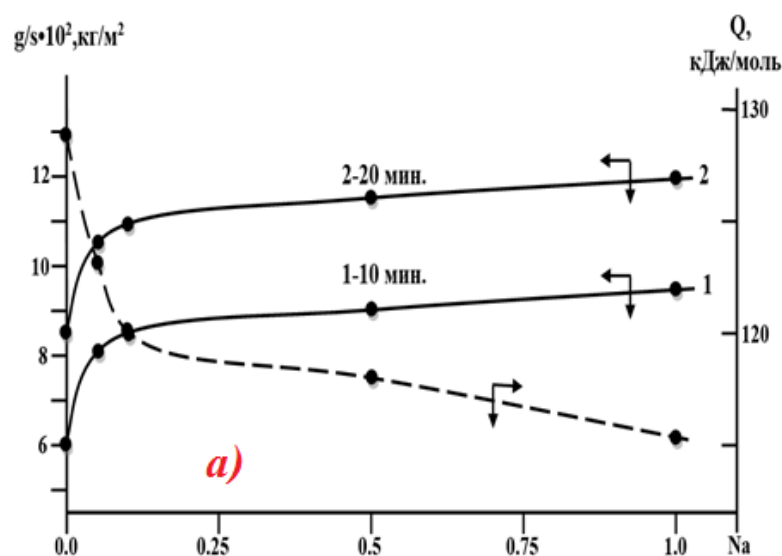


Рисунок 2. Изохроны окисления сплава ZnAl1Ni0.5 с натрием при 523 К (а) и 623 К (б)

Прямолинейный характер полученных графиков во всем изученном интервале температур подтверждает применимость классического уравнения Аррениуса для описания кинетики твердофазного взаимодействия в данной системе. Линейные зависимости, соответствующие модифицированным составам, закономерно смещаются в область более высоких значений $\lg K$ относительно прямой исходного сплава ZnAl1Ni0.5.

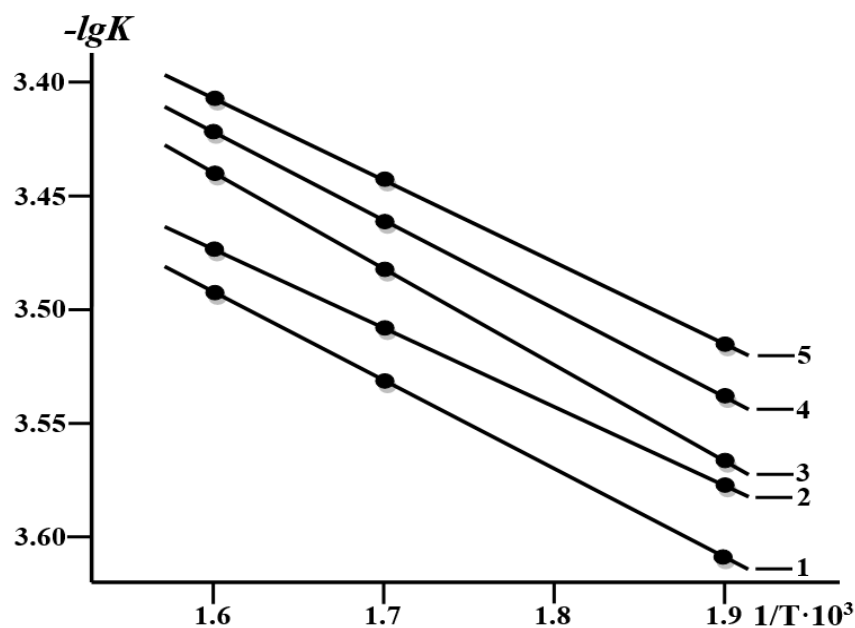


Рисунок 3. Зависимость $-\lg K$ от $1/T$ для сплава $ZnAl1Ni0.5$ (1) с натрием (масс. %): 0.05 (2); 0.1 (3); 0.5 (4); 1.0 (5).

Это графически подтверждает, что легирование натрием интенсифицирует процесс газовой коррозии. Наблюдаемый эффект обусловлен ростом концентрации дефектов и трансформацией фазового состава поверхностной окалины при внедрении ионов натрия в кристаллическую решетку оксидной матрицы.

Для математического описания полученных кинетических зависимостей и установления аналитической связи между изменением удельной массы образцов и продолжительностью процесса высокотемпературного взаимодействия было проведено аппроксимирование экспериментальных данных. В результате математической обработки кривых окисления сплавов системы $ZnAl1Ni0.5$ с натрием были получены полиномиальные уравнения четвертой степени, приведенные далее в табл. 2. Высокие значения коэффициентов регрессии $R = 0.9836 \div 0.9977$ для исходного сплава а для 1.0 масс. % добавки натрия возрастает $R = 0.9799 \div 0.9959$ математически подтверждают адекватность выбранных моделей и свидетельствуют о строгой корреляции между расчетными полиномами и экспериментальными точками. Свободные члены

уравнений (коэффициенты при переменной x), физический смысл которых отражает начальную скорость взаимодействия металлической матрицы с кислородом, закономерно возрастают как с увеличением температуры от 523 до 623 К, так и при росте концентрации лития до 1.0 масс. %, что полностью согласуется с ранее рассчитанными значениями истинной скорости окисления сплавов.

Таблица 2. Полиномы кинетических кривых окисления сплава ZnAl1Ni0.5 с натрием в твёрдом состоянии

Содержание натрия в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии, R
0.0	523	$y = -0,7 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,2 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,10 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,6584x$	0.9836
	573	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,54 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,0137x$	0.9916
	623	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,8 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,10 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,3013x$	0.9977
0.05	523	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,23 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,0183x$	0.9784
	573	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,8 \cdot 10^{-3}x^3 - 4,78 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,2976x$	0.9888
	623	$y = -0,6 \cdot 10^{-7}x^4 + 1,3 \cdot 10^{-3}x^3 - 6,75 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,6242x$	0.9965
0.1	523	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,54 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,0846x$	0.9789
	573	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,19 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,3744x$	0.9906
0.5	523	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,89 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,1612x$	0.9768
	573	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,53 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,4496x$	0.9876
	623	$y = -0,6 \cdot 10^{-8}x^4 + 1,3 \cdot 10^{-3}x^3 - 7,43 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,7678x$	0.9951
1.0	523	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,7 \cdot 10^{-3}x^3 - 4,41 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,2421x$	0.9799
	573	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,1 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,89 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,5228x$	0.9882
	623	$y = -0,6 \cdot 10^{-9}x^4 + 1,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 7,72 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,8322x$	0.9959

Полученные полиномиальные зависимости четвертой степени (табл. 2) математически описывают сложный многостадийный характер гетерогенного

взаимодействия. Тот факт, что линейные коэффициенты (при переменной x) увеличиваются при переходе от чистой матрицы к сплавам с 1.0 масс. % Na, указывает на резкое возрастание начальной химической активности поверхности при контакте с кислородом. Наличие отрицательных знаков при высших степенях полиномов (x^2) и (x^4) математически отражает постепенное торможение процесса во времени, обусловленное ростом диффузионного сопротивления окалины. Внедрение ионов натрия в базовую систему Zn–Al–Ni приводит к значительному увеличению констант данных полиномов. Это объясняется тем, что натрий обладает существенно большим ионным радиусом по сравнению с цинком, алюминием и никелем. Из-за этого в кристаллической решетке формирующихся оксидов ZnO, Al₂O₃ возникают сильные локальные напряжения, приводящие к генерации дополнительных вакансий и дефектов по Френкелю и Шоттки. В результате образующийся оксидный слой становится более рыхлым и проницаемым для встречной диффузии ионов металла и газообразного кислорода, что подтверждается как увеличением коэффициентов аппроксимации, так и падением кажущейся энергии активации.

Такой характер полиномиальных уравнений находится в строгом топологическом соответствии с геометрическим видом квадратичных кривых окисления, представленных далее на рисунке 4. Поскольку реальный процесс взаимодействия твердых сплавов с кислородом воздуха подчиняется параболическому закону, экспериментальные кинетические зависимости имеют выраженную форму парабол второго порядка (в координатах $\Delta m/S)^2$ - τ). Применение аппроксимирующих полиномов четвертой степени позволило с максимальной математической точностью описать данные квадратичные зависимости, сглаживая незначительные флуктуации, вызванные локальным растрескиванием или метастабильным ростом оксидных фаз на начальных этапах термоэкспозиции.

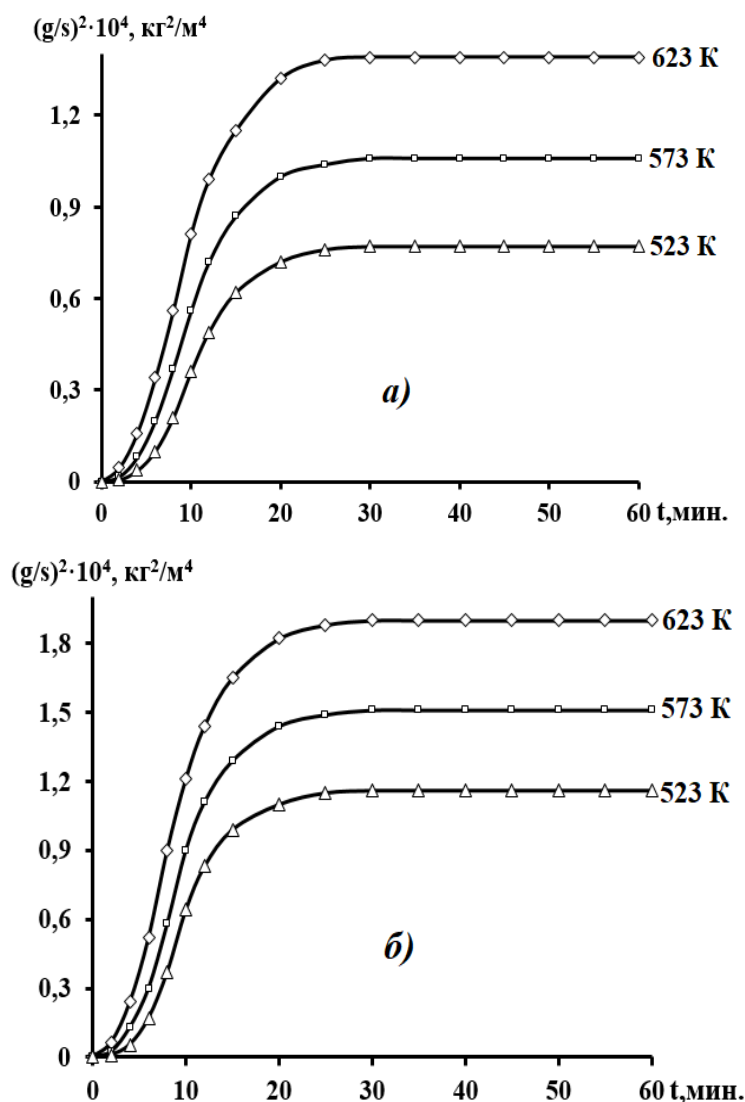


Рисунок 4. Квадратичные кривые окисления в воздушной среде сплава ZnAl1Ni0.5 в твёрдом состоянии: а — исходный сплав; б — сплав, легированный 0.05 масс. % натрия

Таким образом, полученные расчетные модели (табл. 2) полностью подтверждают и дополняют графический материал статьи, доказывая стабильное протекание процесса в рамках классической диффузионной кинетики.

Детальное сопоставление топологии квадратичных кривых (рис. 4) для различных составов позволяет заключить, что введение натрия не меняет параболический механизм окисления, но существенно сдвигает кинетическое равновесие в сторону интенсификации газовой коррозии. Постоянный наклон параболических ветвей подтверждает, что лимитирующим фактором процесса

во всем временном интервале остается встречная диффузия ионов через утолщающуюся окалину. Однако плавная деформация кривых при увеличении содержания натрия до 1.0 масс. % наглядно иллюстрирует снижение экранирующих свойств поверхностного слоя. Модификатор, локализуясь преимущественно на границах зерен и в межфазных границах системы Zn–Al–Ni, разупорядочивает структуру оксида, облегчая перенос кислорода к металлической матрице. Комплексный анализ полученных графических, кинетических и математических данных позволяет подвести итоги выполненного исследования и сделать фундаментальные выводы о характере влияния щелочного металла на жаростойкость изучаемой системы.

Выводы

1. Методом непрерывной термогравиметрии впервые комплексно исследована кинетика высокотемпературного твердофазного окисления цинкового сплава ZnAl1Ni0.5 в зависимости от концентрации натрия (0.05–1.0 масс. %) и температуры (523–623 K) в воздушной среде.
2. Установлено, что легирование натрием интенсифицирует процесс газовой коррозии базовой матрицы: с ростом содержания модификатора и температуры истинная скорость окисления сплавов закономерно увеличивается, что сопровождается снижением кажущейся энергии активации процесса со 129.0 до 115.4 кДж/моль, указывая на уменьшение термической стабильности защитных слоев.
3. На основе математической обработки экспериментальных кинетических кривых рассчитаны полиномиальные уравнения четвертой степени с высокими коэффициентами регрессии ($R=0.9768 \div 0.9977$). Анализ полученных математических моделей и констант скоростей подтверждает, что процесс взаимодействия сплавов системы Zn–Al–Ni–Na с кислородом воздуха протекает во времени по параболическому механизму.

Литература

1. G. Kiliñçeker, H. Galip, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 45, 2, 232-240, (2009).
2. C. Muller, M. Sarret, M. Benballa, Electrochim. Acta, 46 (18), 2811-2817, (2001).
3. S.K. Rajappa, T.V. Venkatesha, B.M. Praveen, Bulletin of Materials Science, 31, 1, 37-41, (2008).
4. A.M. Dutra, N.C. Eduardo, Z.N. Roberto, Materials Sciences and Applications, 3, 6, 348-354, (2012).
5. H.L. Myeong, W.K. Yeon, M.L. Kyung, H.L. Seung, M.M. Kyung, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 23, 876-880, (2013).
6. Дж.Н. Алиев, З.Р. Обидов, И.Н. Ганиев// - Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Acad. Publ, 2013. – 129 с.
7. З.Р. Обидов, И.Н. Ганиев, -Душанбе: «Андалеб Р», 2015. – 334 с.
8. R.N. Amini, Z.R. Obidov, I.N. Ganiev, R.B. Mohamad// J. of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2, 2, 110-114, (2012).
9. R.N. Amini, Z.R. Obidov, I.N. Ganiev, R.B. Mohamad// Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2, 2, 127-131, (2012).
10. R.N. Amini, Z. Nizomov, M. Razazi, I.N. Ganiev, Z.R. Obidov// Oriental Journal of Chemistry, 28, 2, 841-846, (2012).
11. R.N. Amini, M.B. Irani, I.N. Ganiev, Z.R. Obidov// Oriental Journal of Chemistry. – 2014. V. 30. № 3. – P. 969-973.
12. Ганиев, И. Н. Потенциал свободной коррозии алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (“Алдрей”), легированного бериллием, в среде электролита 3%-ного NaCl / И. Н. Ганиев, Т. М. Умарова // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. – 2019. – № 1,3(9,11). – С. 66-72. – EDN RHTZZZ.
13. Тоирзода М.А., Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Саидзода М.М. Кинетика и механизм высокотемпературного окисления алюминиевого сплава системы Al-Mg-Li-Zr, легированного барием // Вестник Филиала Московского

государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе.
– 2026. – Т. 1. – № 2 (55). – С. 37-47.

14. Тоирзода М.А., Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Саидзода М.М. Экспериментальное исследование удельной теплоёмкости и коэффициента теплоотдачи сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ с барием // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. – 2026. – Т. 1. – № 2 (55). – С. 47-60.
15. Синявский В.С., Уланова В.В., Калинин В.Д. Особенности механизма межкристаллитной коррозии алюминиевых сплавов // Защита металлов. – 2004. – Т.40. – № 5. – С. 537-546.
16. Самарцев В.М. Анионная активация алюминия при анодном растворении в галидсодержащих средах // Защита металлов. – 1992. – Т. 28. – № 5. – С. 760-767.
17. Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Савдуллоева С.С., Джайлоев Д.Х., Саидзода М.М., Киреев С.Ю., Норова М.Т. Кинетика окисления алюминиевого сплава $\text{AlMg}_{5.5}\text{Li}_{2.1}\text{Zr}_{0.15}$ типа дюралюмин с лантаном в твёрдом состоянии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2026. – № 2 (174). – С. 77-89.
18. Исмонов Р.Д., Ганиев И.Н., Одиназода Х.О. Потенциодинамическое исследование сплава AlBe1 , легированного индием, в среде электролита 0.3%-ного NaCl // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. Серия: Естественные науки. – 2024. – Т. 1. – № 3(41). – С. 62-69.
19. Григорьева И.О., Дресвянников А.Ф. Анодное поведение алюминия в нейтральных электролитах // Вестник технологического университета, г. Казань. – 2010. – № 7. – С. 153-161.

**INFLUENCE OF SODIUM ON THE THERMAL STABILITY OF THE OXIDATION
PROCESS OF THE ZnAl1Ni0.5 ALLOY IN THE SOLID STATE**

I.N. Ganiev¹, L.Z. Alieva², U.M. Murodalizoda³, M.M. Saidzoda²

V.I. Nikitin Chemistry Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan¹

Academy of Tourism of the International University of Tourism and

Entrepreneurship of Tajikistan²

Dangara State University³

Abstract. The effect of sodium within the concentration range of 0.05–1.0 wt. % on the high-temperature oxidation kinetics of the ZnAl1Ni0.5 zinc alloy in the solid state was comprehensively studied using high-temperature thermogravimetry. Experimental investigations were carried out in air within the temperature range of 523, 573, and 623 K. It was established that the interaction between the studied alloys and atmospheric oxygen proceeds over time according to a parabolic law. It was demonstrated that sodium alloying intensifies the oxidation process: with an increase in sodium concentration from 0 to 1.0 wt. %, the true oxidation rate increases (for instance, at 523 K, from $2.45 \cdot 10^{-4}$ to $3.04 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Concurrently, a consistent decrease in the apparent activation energy of the oxidation process from 129.0 to 115.4 kJ/mol is observed, indicating a reduction in the thermal stability of the protective oxide film upon the introduction of the modifier.

Keywords: zinc alloys, Zn–Al–Ni system, sodium, oxidation kinetics, thermogravimetry, true oxidation rate, apparent activation energy.

ТАЪСИРИ НАТРИЙ БА УСТУВОРИИ ҲАРОРАТИИ ҶАРАЁНИ ОКСИДШАВИИ ХҶЛАИ ZnAl1Ni0.5 ДАР ҲОЛАТИ САХТ

Ғаниев И.Н.¹, Алиева Л.З.², Муродзода У.М.³, Саидзода М.М.²

Институтҳои кимиёи ба номи В.И. Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон¹

Муассисаи давлатии «Академияи сайёҳӣ»-и Муассисаи давлатии

«Донишгоҳи байналмилалӣ сайёҳӣ ва соҳибкорӣ Тоҷикистон»²

Донишгоҳи давлатии Дангара³

Аннотатсия. Дар қор бо усули термогравиметрияи ҳарорати баланд таъсири натрий дар ҳудуди консентратсияи 0.05–1.0 %-и массавӣ ба кинетикаи оксидшавии ҳарорати баланди хӯлаи руҳи тамғаи ZnAl1Ni0.5 дар ҳолати сахт ба таври комплексӣ омӯхта шудааст. Тадқиқотҳои таҷрибавӣ дар муҳити ҳаво дар ҳудуди ҳароратҳои 523, 573 ва 623 К гузаронида шуданд. Муайян карда шуд, ки ҷараёни таъсири мутақобилаи хӯлаҳои омӯхташаванда бо оксигени ҳаво бо гузашти вақт мувофиқи қонуни параболаи сурат мегирад. Нишон дода шудааст, ки легиронидан (омехта кардан) бо натрий ҷараёни оксидшавиро шиддат

мебахшад: бо афзоиши концентратсияи натрий аз 0 то 1.0 %-и массавӣ суръати ҳақиқии оксидшавӣ зиёд мешавад (масалан, дар ҳарорати 523 K аз $2.45 \cdot 10^{-4}$ то $3.04 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻²·с⁻¹). Дар айни замон, коҳиши қонуниятии энергияи фаъолиавии зоҳирии ҷараёни оксидшавӣ аз 129.0 то 115.4 кҶ/мол мушоҳида мешавад, ки ин аз паст шудани устувории ҳароратии пардаи оксидии муҳофизатӣ ҳангоми ворид кардани модификатор шаҳодат медиҳад.

Калидвожаҳо: *хӯлаҳои руҳ, системаи Zn–Al–Ni, натрий, кинетикаи оксидшавӣ, термогравиметрия, суръати ҳақиқии оксидшавӣ, энергияи фаъолиавии зоҳирий.*

Сведения об авторах: **Ганиев Изатулло Наврузович** – д.х.н., профессор, академик Национальной академии наук Таджикистана, заведующий лабораторией Института химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана. **Адрес:** Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, пр. Айни 299/2. **Тел.:** (+992 93) 572 88 99. **E-mail:** ganievizatullo48@gmail.com.

Алиева Лола Зухурбековна – к.т.н., руководитель отдела, специалист в области материаловедения Научно-исследовательского института устойчивого развития и зелёной экономики Международного университета туризма и предпринимательства Таджикистана. **Адрес:** 734055, Республика Таджикистан, Душанбе, ул. Борбад 48/5. **Тел.:** (+992 98) 853 63 15. **E-mail:** lolaalieva101195@mail.ru.

Муродализода Умед Муродали – старший преподаватель кафедры инженерии и энергетики Дангаринского государственного университета. **Адрес:** 735320, Республика Таджикистан, Дангаринский район, г. Дангара. ул. Маркази 25. **Тел.:** (+992 90) 044 60 87. **E-mail:** umedmm.87@mail.com.

Саидзода Масрур Мирзохон – д.т.н., профессор, ректор Академии туризма Государственного учреждения «Международный университет туризма и предпринимательства Таджикистана». **Адрес:** 734055, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Борбад, 48/5. **Тел.:** (+992 93) 127 0607. **E-mail:** masrur.saidzoda.88@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллифон: **Ганиев Изатулло Наврузович** – академики Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, д.и.к., профессор, мудири лабораторияи Институти кимиёи ба номи В.И. Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон. **Суроға:** 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Айнӣ 299/2. **Тел.:** (+992 93) 572 88 99. **E-mail:** ganievizatullo48@gmail.com.

Алиева Лола Зухурбековна – н.и.т., мудири шӯба, мутахассис дар соҳаи маводшиносии Пажӯҳишгоҳи илмӣ-тадқиқотии рушди устувор ва иқтисоди сабзи Донишгоҳи байналмилалӣ

сайёҳӣ ва соҳибкори Тоҷикистон. **Суроға:** 734055, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Борбад 48/5. **Тел.:** (+992 98) 853 63 15. **E-mail:** lolaalieva101195@mail.ru.

Муродализода Умед Муродалӣ – муаллими калони кафедраи муҳандисӣ ва энергетика, Донишгоҳи давлатии Данғара. **Суроға:** 735320, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ноҳ. Данғара, ш. Данғара, к. Марказӣ 25. **Тел.:** (+992 90) 044 60 87. **E-mail:** umedmm.87@mail.com

Саидзода Масрур Мирзохон – д.и.т., профессор, Ректори Муассисаи давлатии «Академияи сайёҳӣ»-и Муассисаи давлатии «Донишгоҳи байналмилалӣ сайёҳӣ ва соҳибкори Тоҷикистон». **Суроға:** 734055, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Борбад 48/5. **Тел.:** (+992 93) 127 06 07. **E-mail:** masrur.saidzoda.88@mail.ru.

Information about the authors: Ganiev Izatullo Navruzovich – Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, DSc in Chem., Professor, Head of Laboratory at the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan. **Address:** Ayni Aven., 299/2, Dushanbe, Tajikistan, 734063. **Phone:** (+992 93) 572 88 99. **E-mail:** ganievizatullo48@gmail.com.

Alieva Lola Zukhurbekovna – Cand. Sc. in Tech., Head of Department, specialist in Materials Science at the Research Institute of Sustainable Development and Green Economy of the International University of Tourism and Entrepreneurship of Tajikistan. **Address:** Borbad Str., 48/5, Dushanbe, Tajikistan, 734055. **Phone:** (+992 98) 853 63 15. **E-mail:** lolaalieva101195@mail.ru.

Murodalizoda Umed Murodali – Senior Lecturer of the Department of Engineering and Energy, Dangara State University. **Address:** Markazi Str., 25, Dist., Dangara city, Tajikistan, 735320. **Phone:** (+992 90) 044 60 87. **E-mail:** umedmm.87@mail.com.

Saidzoda Masrour Mirzokhon – DSc in Tech., Professor, Rector of the Academy of Tourism of the State Institution "International University of Tourism and Entrepreneurship of Tajikistan". **Address:** Borbad Ave., 48/5, Dushanbe, Tajikistan, 734055. **Phone:** (+992 93) 127 06 07. **E-mail:** masrur.saidzoda.88@mail.ru.

КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОХИМИИ ГОРНЫХ РЕК И СТЕПЕНИ ИХ ПРИМЕНИМОСТИ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ

Норматов И.Ш.¹, Ходжизода А.Э.¹, Шарофзода Ф.А.²

Таджикский национальный университет¹

Академия Министерства внутренних дел Республики Таджикистан²

Аннотация. Атмосферные процессы могут оказать существенное влияние на активацию подводных флор и биоту в генерации химических реакций с формированием комплексных соединений металлов, которые могут представлять серьёзную опасность для водопользователей. Цепочка “почва-растение - организм человека” признана основным каналом переноса химических элементов в организм человека. Коэффициент переноса зависит от состояния почвы, pH, глинистых содержаний катионов, органических веществ в почве и составе оросительной воды. В настоящей работе является исследован химический состав реки Сурхоб и её притоков рек Кызылсу и Муксу и оценки их применимости для орошения сельскохозяйственных земель. Установлено, что по основным показателям, а именно по значениям доли адсорбируемого, растворимого и обменного натрия река Сурхоб и её притоки вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к водам для орошения. Показано, что формирование химического состава рек в основном происходит в результате выветривания горных пород и вымывания геологических отложений территорий бассейнов.

Ключевые слова: река Сурхоб, притоки, сельское хозяйство, орошение, выветривание пород, гидрохимия, SAR, SSP, ESP.

Введение

Реки как составная часть глобального круговорота воды, определяющие ландшафт и экологическое состояние бассейна, рассматриваются в качестве динамического агента переноса веществ и химических ингредиентов. Развитие человеческого общества и отраслей экономики, необходимых для удовлетворения каждодневной потребности человека сопровождалось нарастанием антропогенной нагрузки на водные артерии сбросом отходов секторов экономики. Ежегодный фатальный исход около пяти млн. человек употреблением загрязненной воды, прогнозы по трудности в водоснабжении

около 3 млрд. человек к 2025 году и отсутствие доступа более 4 млрд. человек к централизованной канализации вызывают особую тревогу [1].

Ныне дефицит питьевой воды превратился в глобальную экологическую проблему. Физико-химический подход к мониторингу качества воды включающий широкий набор показателей обеспечивает основу для оценки пригодности воды для целевого использования и улучшения существующих условий [2]. Единого или простого показателя качества воды не существует. Характер и уровень загрязнения воды характеризуются несколькими физическими, химическими и биологическими параметрами [3]. Ухудшение качества воды приводит к нарушению баланса экосистемы, загрязнению почвы и поверхностных источников воды.

Перенос химических элементов по цепочку “почва-растение - организм человека” определяется способностью флоры данной территории избирательно поглощать определенные элементы.

Для определения изменения концентраций химических элементов вдоль русла реки можно применить модель, основанной на уравнение конвекции-диффузии [9]:

$$u \cdot \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -k \cdot C(x,t) \quad (1)$$

где u - средняя скорость потока в рабочем участке (м/с);

$C(x,t)$ - концентрации тяжелых металлов, мг/л;

k - скорость осаждения, 1/с;

x - расстояние по руслу реки, м;

t - время, с.

Допуская возможность протекания обменных реакций и образования комплексных соединений металлов с органическими и неорганическими лигандами можно ожидать осаждение металлов с определенной скоростью. В данном случае общее решение уравнения (1) можно записать в следующей форме [3]:

$$C(x,t) = F(t \cdot u - x \cdot u) \cdot e^{-kx} \quad (2)$$

Если принять за $x = 0$ координату точки, расположенной на участке реки до зоны мелиорации, и, что концентрация в этой точке формируется естественным фоном и не изменяется со временем, т.е. $C(0,t) = C_1$ общее решение уравнения (1) позволяет получить классическую экспоненциальную зависимость изменения концентраций химических элементов вдоль русла реки [3]:

$$C(x,t) = C_1 \cdot e^{-\frac{kx}{u}} \quad (3)$$

Уравнение (3) может быть использовано для описания распределения концентраций химических элементов вдоль русла реки начиная с зоны формирования до рассеивания реки.

Объект и методы исследований

Настоящая работа посвящена мониторингу гидрохимии реки Сурхоб одной из притоков реки Вахш. Учитывая доминирование влияния щелочных и щелочноземельных элементов на развитие флоры и производительности сельскохозяйственных земель, проводились химические анализы катионов в составе притоков реки Вахш рек Сурхоб, Кызылсу и Муксу (рис. 1). Методология исследований заключалась в том, что содержание катионов проводились в каждой из притоков и далее после их слияния. Химические анализы проводились в соответствии со стандартами по определению щелочных и щелочноземельных катионов и кислотных анионов (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-).

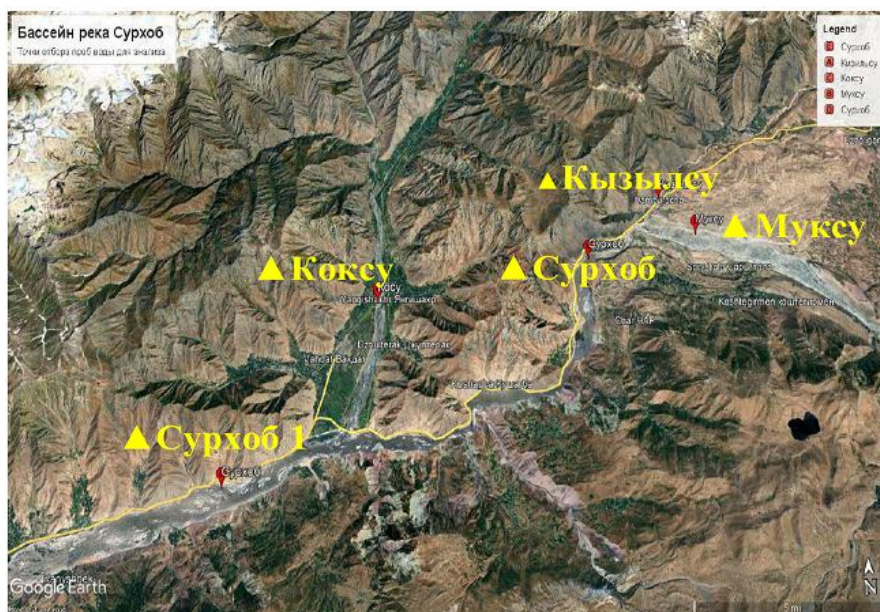
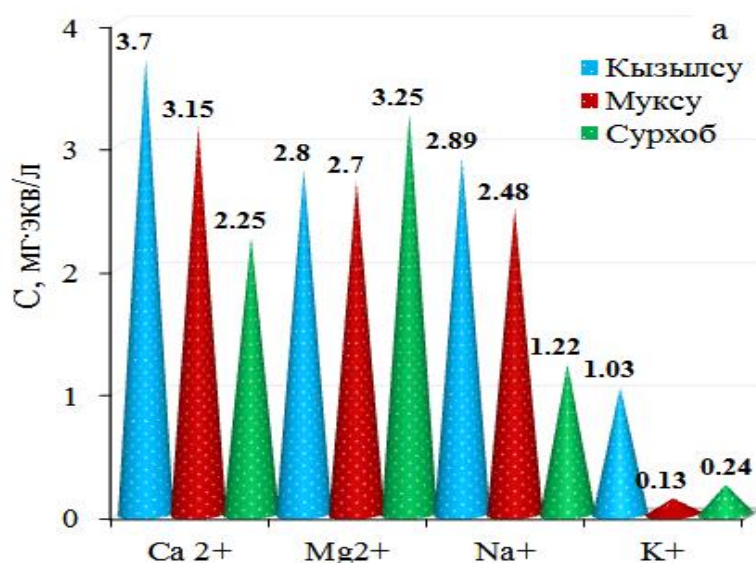


Рисунок 1. Карта верховья реки Вахш с притоками

Результаты и обсуждение

На рис. 2 а, б представлено содержание катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и анионов Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- в составе вод рек Кызылсу, Муксу и Сурхоб. Как следует из рис.2,а в стоке реки Кызылсу преобладают катионы Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , а содержание катионов Mg^{2+} в реке Муксу. Полученные результаты дают основание предположить, что на верховье реки Вахш в зоне формирования стока ее притоков формирование химического состава рек главным образом протекает в результате естественного процесса вымывания горных пород.



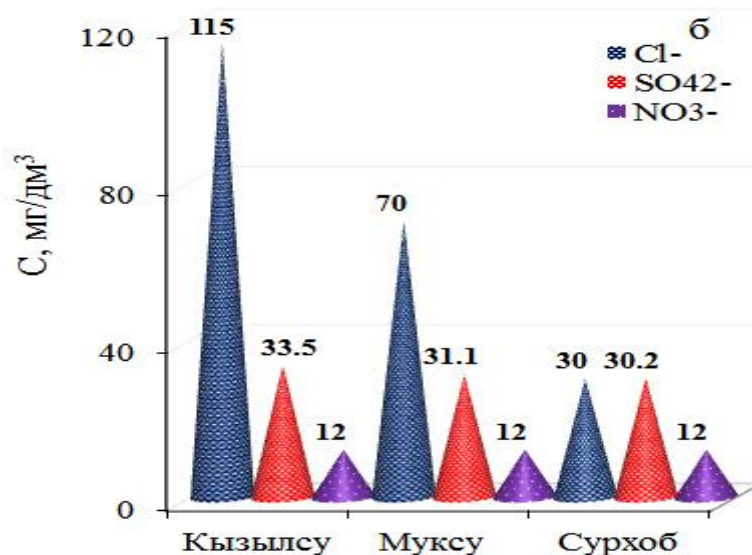


Рисунок 2. Содержание щелочных (Na^+ , K^+), щелочноземельных (Ca^{2+} , Mg^{2+}) элементов в стоке притоков реки Вахш

Полученные результаты анализов анионов Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- в стоке рек, представленные на рис. 2 показывают, что содержание хлорид-ионов преобладает в реках Кызылсу и Муксу. Сопоставление их с данными приведенных на рис.1 показывает, что в минералогическом отношении бассейны рек богаты залежами хлорида натрия, а присутствие анионов NO_3^- в водной среде обусловлены эрозией почв бассейнов рек.

Из рис. 1 видно, что к среднему течению реки Сурхоб сливается река Коксу, результаты химических анализов катионов щелочных, щелочноземельных и анионов Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- которых представлены на рис. 3 а, б.

Как следует из рис. 3 река Коксу характеризуется более богатым содержанием катионами Ca^{2+} , Mg^{2+} и анионами SO_4^{2-} , NO_3^- . Основываясь на результаты [4] можно утверждать, что происхождение катионов и анионов в реке Коксу обусловлено процессами вымывания алюмосиликатных горных пород кальция и магния.

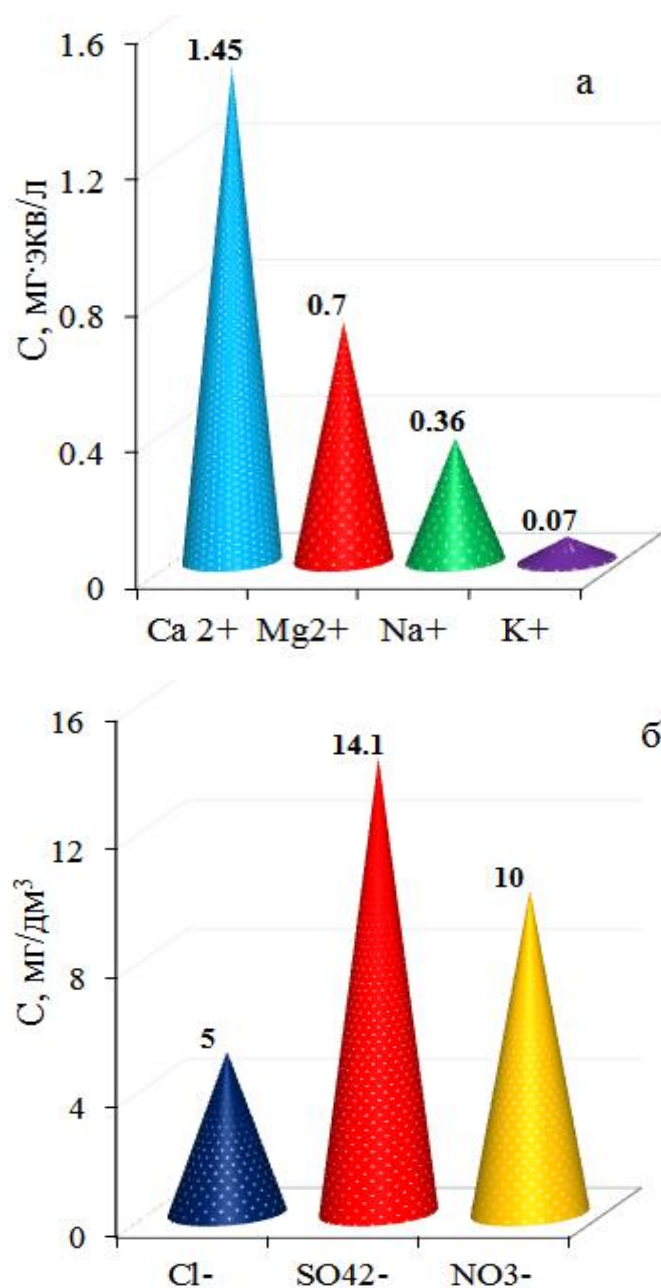


Рисунок 3. Значения концентраций катионов Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ и анионов Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ в стоке реки Коксу

После слияния реки Коксу проводился отбор проб воды из реки Сурхоб в точке “Сурхоб 1” (рис.1), результаты анализов щелочных, щелочноземельных элементов и анионов Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ которых обобщены в рис.4.

Динамика изменения концентраций химических элементов из верховья в низовья реки, как следует из сравнения рис. 3 и 4, не описывается уравнениями (1) - (4). Это обусловлено тем, что в водной среде в зависимости от водородного

показателя (рН) происходят ряд химических процессов с участием катионов и анионов с образованием комплексных, хотя и нестабильных, соединений и образование осадков. Тем более хорошая растворимость соединений щелочных и щелочноземельных элементов характеризуемые ионной природы химических связей способствуют их активности к формированию новых и в большинстве случаев комплексных соединений.

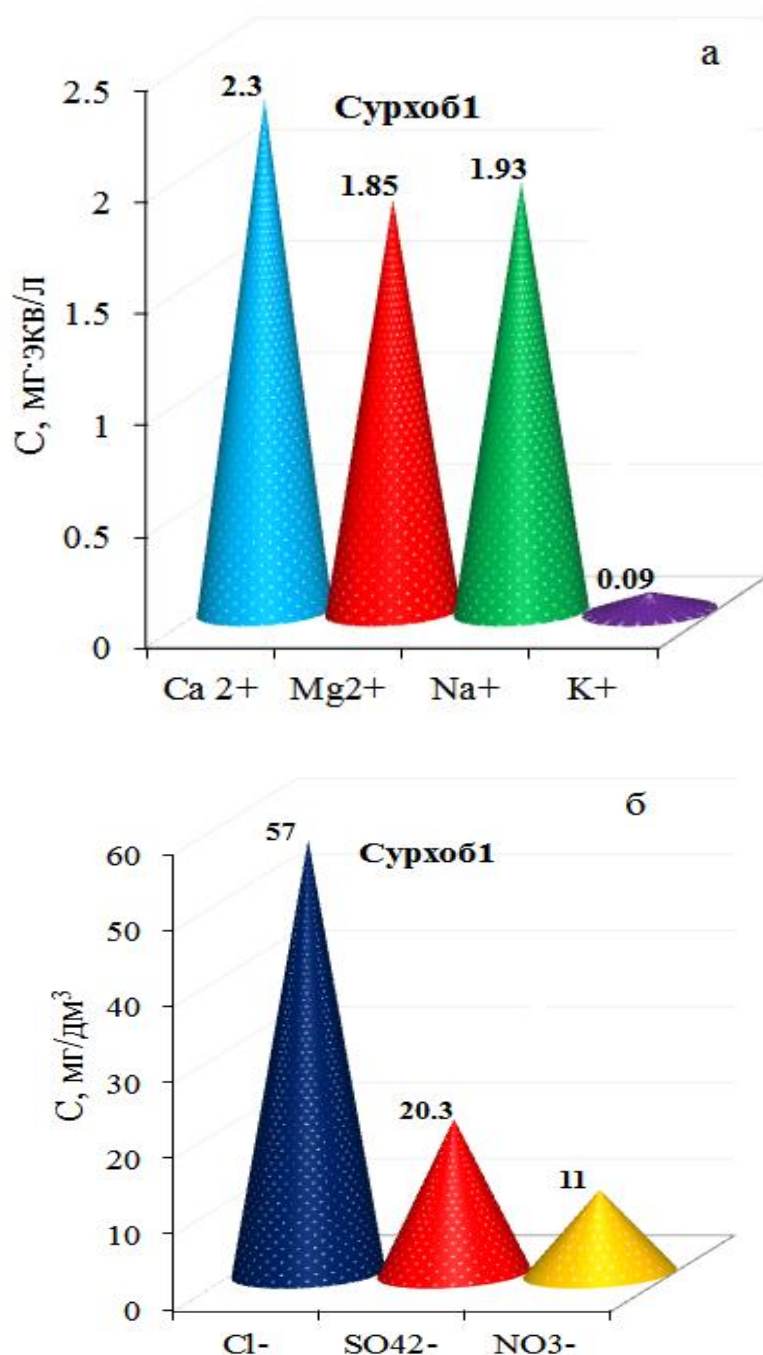


Рисунок 4. Концентрации щелочных, щелочноземельных катионов (а) и анионов (б) в низовье реки Сурхоб

Качество воды наряду с факторами устойчивости культур к засолению, пористости и структуры почв является важным компонентом в формировании агрохимии почв, развитии культур и продуктивности сельскохозяйственных земель. Влияние засоления на осмотическое давление в ненасыщенной зоне почвы одно из наиболее важных аспектов качества воды потому что это влияет на доступность воды к корневой части растений. Натрий в поливной воде может отрицательно сказываться на структуру почвы путем снижения скорости поступления воды в корень растений [5]. Фитотоксичные микроэлементы, такие как бор, тяжелые металлы могут остановить рост растений или сделать урожай непригодным для потребления человеком или других предполагаемых целей. Во избежание таких негативных последствий важно определения качества воды для орошения и этот шаг можно считать руководством по мониторингу, планированию и обслуживанию водных ресурсов [6].

Увеличение доли адсорбируемого натрия (SAR), вызванное поливной водой ухудшает инфильтрацию воды, повышение щелочности и усиливает физико-химическую дисперсию. Эта дисперсия, в свою очередь, приводит к уменьшению гидравлической проводимости грунта [7].

Процентное содержание (% Na) и доли адсорбируемого натрия (SAR) в орошаемой воде определялись с использованием соотношений [8,9]:

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (4)$$

$$\%Na^{+} = \frac{(Na^{+} + K^{+}) \cdot 100}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+})} \quad (5)$$

Ещё одним фактором, оказывающее существенное влияние на развитие сельскохозяйственных культур и характеризующего пригодность воды для орошения является доля растворимого натрия (SSP) речной воды, определяемой соотношением [10]:

$$SSR = \left(\frac{Na^{+}}{Na^{+} + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

$$ESP = \frac{Na^{+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \quad (7)$$

Основные показатели, определяющие степень применимости вод для орошения по содержанию катионов натрия в стоке рек Кызылсу, Муксу и Сурхоб (SAR, ESP, PAR) и сравнительные их значений на верховье и низовье реки Сурхоб (Сурхоб 1) представлены соответственно на рис. 5 и 6.

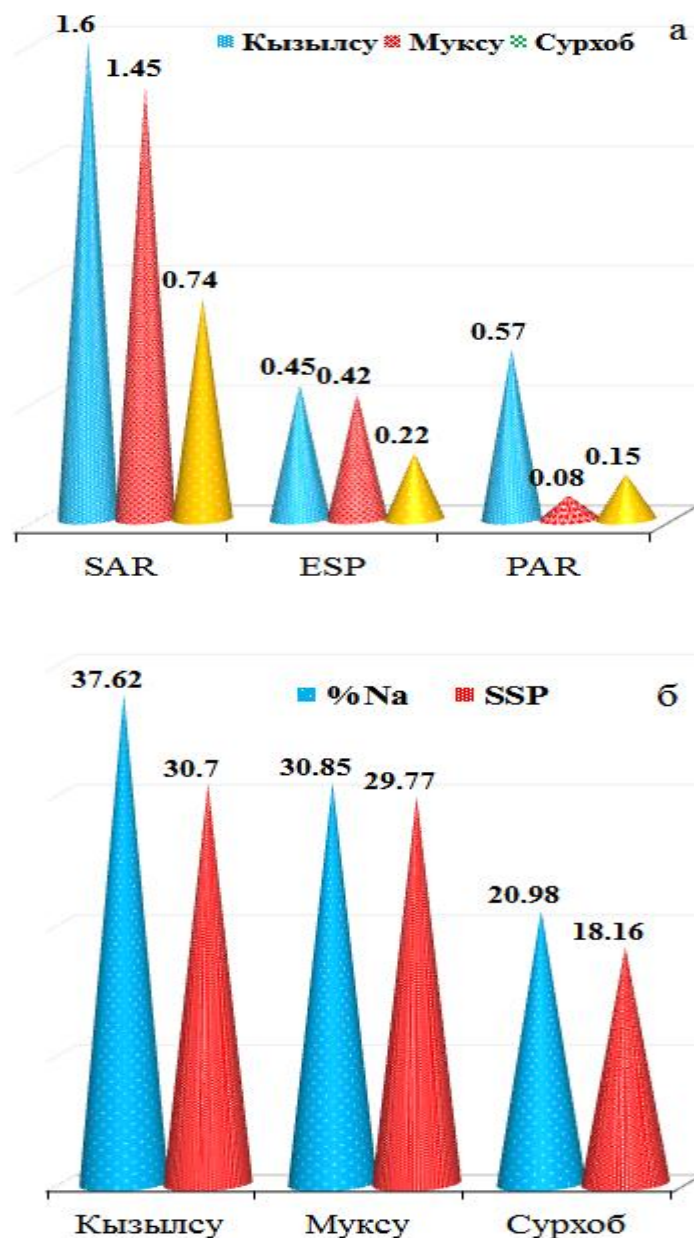


Рисунок 5. Значения доли адсорбируемого натрия (SAR), калия (PAR), обменного (ESP) натрия (а) и процентного содержания (% Na) и доли растворимого натрия (SSP) (б) в стоках рек Кызылсу, Муксу и Сурхоб

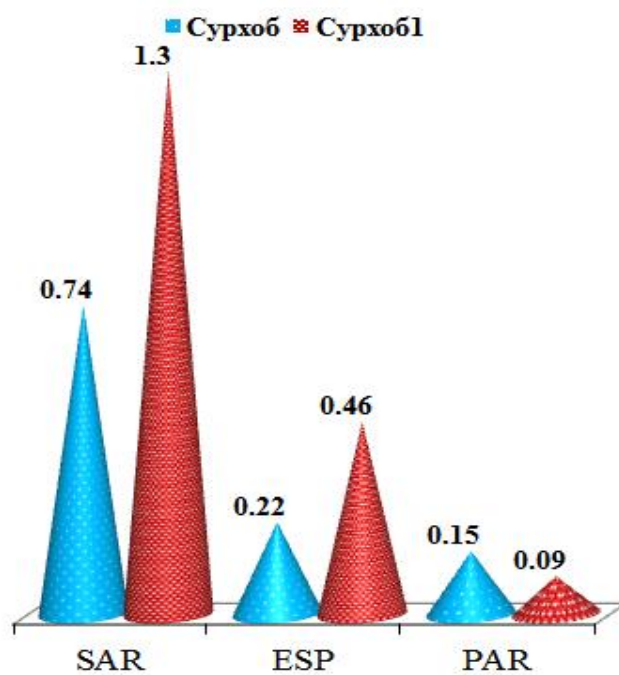
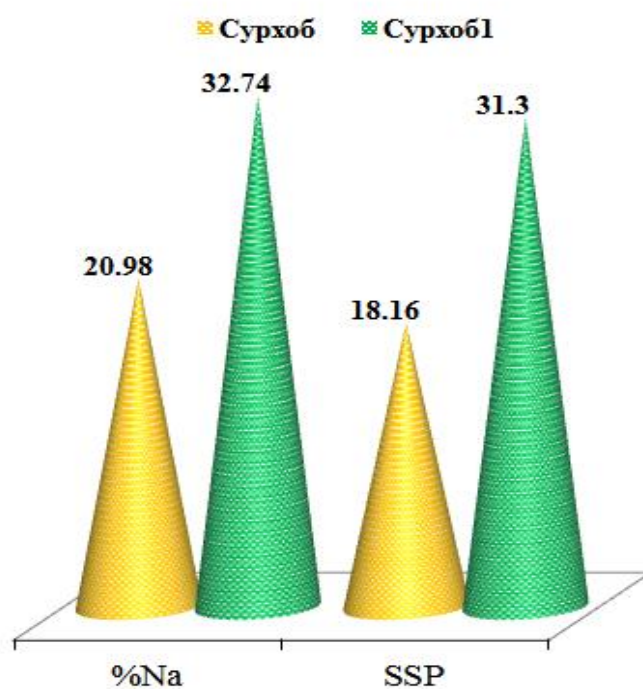


Рисунок 6. Сравнение значений процентного содержания (% Na), доли растворимого натрия (SSP) (а) и доли адсорбируемого натрия (SAR) и калия (PAR) и обменного (ESP) натрия (б) в верховье и низовье (Сурхоб 1) реки Сурхоб

Таблица 1. Пределы показателей по применимости вод для орошения [9]

SAR	Класс	Mg^{2+}/Ca^{2+}	Класс	SSP	Класс	ESP	Класс
1-10	отл	<1.5	отлично	< 50	безопасный	< 20	отлично
10-18	хор	1.5-3.0	отлично	> 50	непод - ходящий	20-40	хорошо
18-25	подход- ящий	> 3.0	неподход ящий			60-80	плохо
> 25	непод ходящий					>80	очень плохо

Выводы

Сравнение полученных значений, указывающих о степени применимости вод для орошения со стандартами ФАО (таблица 1) показывает, что вода реки Сурхоб и её притоков вполне пригодны для орошения сельскохозяйственных земель.

Литература

1. Otieno A.A., Kitur E.L., Gathuru G. Physico-Chemical Properties of River Kisat, Lake Victoria Catchment, Kisumu County, Kenya // Environment Pollution and E Climate Change. 2017. V. 1(4). – P.1000137-1000141.
2. Ali M., Salam A., Ahmed, N., Khan B., Khokhar M. Y. Monthly variation in physicochemical characteristics and metal contents of Indus River at Ghazi Ghat, Muzaffargarh, Pakistan // Pakistan J. Zoology. 2004. V. 36(4). – P. 295-300.
3. Chitmanat C. Traichaiyaporn, S. Spatial and temporal variations of physical chemical water quality and some heavy metals in water, sediments and fish of the Mae Kuang River, Northern Thailand // International Journal of Agriculture and Biology. – 2010. V.12 (6). – P. 816-820.

4. Normatov I. Sh., Goncharuk V.V., Normatov A.I., B.H. Abdurahimov B.H. About the Mechanisms of Formation of the Chemical Composition of the High-Mountain Rivers of Central Asia: The Shakh dara River and its Contribution to the Hydrochemistry of the Transboundary Panj River // J. Water Chem. Technol. – 2022. V. 44. – P. 56-6.
5. Normatov I. Sh., Goncharuk V.V., Kurbonali K., Anderson R. Influence of Natural Water Hydrochemistry in the Vakhsh River Basin on the Water–Salt Regime of the Irrigated Agricultural Land // J. Water Chem. Technol. – 2024. V. 46. – P. 93-99.
6. Bauder I.A., Waskom R.M., Davis J.O. Irrigation water quality criteria. Colorado State University. US Department of Agriculture. Research Report. 7/03_56. 2007.
7. Levy G., W. Miller W. Aggregate stability of some southern US soils // Soil Sci. Soc. America. – 1997. V.61. – P.1176-1182.
8. Misaghi F., Delgosha F., Razzaghmanesh M., Myers B. Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezel Ozan River // Sci. Tot. Env. – 2017. V. 589. – P. 107-116.
9. Adegbola G.A., Dauda M., Aluko T.O. Assessment of the suitability of water quality for irrigation in Ogbomoso, Oyo State // GSC Biological and Pharmaceutical Sciences. – 2019. V. 9(2). – P. 21-31.
10. Cicchella D., Albanese S., De Vivo B., Dinelli E., Giaccio L., Lima A., Valera P. Trace elements and ions in Italian bottled mineral waters: identification of anomalous values and human health related effects // J. Geochem. Exploration. – 2010. V. 107 (3). – P. 336-349.

ОМИЛҲОИ АСОСИИ ТАШАККУЛИ ГИДРОХИМИЯ ДАР ДАРЁҲОИ КЌҲӢ ВА ИСТИФОДАИ ОНҲО БАРОИ ОБЁРӢ

Норматов И.Ш.¹, Ҳочизода А.Э.¹, Шарофзода Ф.А.²

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон¹

Академияи Вазорати корҳои дохилии Ҷумҳурии Тоҷикистон²

Аннотатсия. Таъсири шадиди тағйирёбии иқлим, ки дар даҳсолаи охир ба мушоҳида мерасад ба фаъолияти ҷузъҳои экосистема таъсири назаррас мерасонад. Равандҳои атмосферӣ, ки дар натиҷаи пайдо гардидани градиентҳои ҳарорат тақсимои фазоии намояи ва боришот, бухоришавии об ва дар аксари арзҳо тағйирёбии давраи боришоти максималӣ ва обхезии дарёҳоро ба таври назаррас тағйир медиҳанд. Равандҳои атмосферӣ (ташаққули циклонҳо ва антициклонҳо ва амсоли онҳо) метавонанд ба фаъолияти флора ва биотаи зеробӣ дар ҷараён бахшидани онҳо ба реаксияҳои кимиёвӣ ва ба ин васила тавлид гардидани пайвастагиҳои мураккаби кимиёвӣ, ки метавонанд барои истифода барандагони об хатари ҷиддӣ эҷод кунанд, сабаб шаванд. Ҳадафи мақола таҳқиқи таркиби кимиёвии дарёи Сурхоб ва шохобҳои он, дарёҳои Қизилсу ва Муқсу, дар болооби дарёи Вахш ва арзёбии мувофиқати онҳо барои обёрии кишоварзӣ мебошад. Муайян карда шуд, ки бар асоси нишондиҳандаҳои асосӣ, яъне таносуби натрий, натрийи адсорбсияшуда, ҳалшаванда ва ивазшаванда, дарёи Сурхоб ва шохобҳои он талаботи оби обёриро пурра қонеъ мекунад. Нишон дода шудааст, ки ташаққули таркиби кимиёвии дарёҳо асосан дар натиҷаи шусташавии ҷинсҳои кӯҳӣ ва элементҳои таркиби хоки ҳавзаҳо ба амал меояд.

Калидвожаҳо: дарёи Сурхоб, шохобҳо, кишоварзӣ, обёрӣ, шусташавии ҷинсҳои кӯҳӣ, гидрохимия, SAR, SSP, ESP.

KEY FACTORS IN THE FORMATION OF HYDROCHEMISTRY OF MOUNTAIN RIVERS AND THEIR APPLICABILITY FOR IRRIGATION

I. Sh. Normatov¹, A.E. Khodjizoda¹, F.A. Sharofzoda²

Tajik National University¹

Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan²

Annotation. The significant impact of climate change observed over the past decade has a significant impact on the functioning of ecosystem components. Atmospheric processes resulting from the formation of temperature gradients significantly alter the spatial distribution of humidity and precipitation, water evaporation, and, in most latitudes, periods of maximum precipitation and river floods. Atmospheric processes (the formation of cyclones and anticyclones, etc.) can activate underwater flora and biota in rivers, leading to chemical reactions and the formation of complex chemical compounds that pose a serious threat to water users. The aim of this study is to study the chemical composition of the Surkhob River and its tributaries, the Kyzylsu and Muksu Rivers, upstream of the Vakhsh River, and assess their suitability for agricultural irrigation. It was found that, based on key parameters, namely sodium, adsorbed, soluble, and exchangeable sodium content,

the Surkhob River and its tributaries fully meet irrigation water requirements. It is shown that the formation of the rivers' chemical composition occurs primarily as a result of the leaching of rocks and elements from the soils of the basins.

Keywords: Surkhob River, tributaries, agriculture, irrigation, rock erosion, hydrochemistry, SAR, SSP, ESP.

Сведения об авторах: **Норматов Ином Шерович** – чл-корр. Национальной Академии наук Таджикистана, д.х.н., профессор, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии Таджикского национального университета. **Адрес:** 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки 17. **Тел.:** (+992 91) 817 73 90. **E-mail:** inomnor@gmail.com.

Ходжизода Абдусамад Эшонкул – PhD студент кафедры метеорологии и климатологии Таджикского национального университета. **Адрес:** 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки 17. **Тел.:** (+992 92) 633 05 88. **E-mail:** hojiev99@list.ru.

Шарофзода Фируз Алиджон – руководитель факультета №5 Академии Министерства внутренних дел Республики Таджикистан. **Адрес:** 734024, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Мاستонгулова 3. **Тел.:** (+992 90) 432 20 22. **E-mail:** firuz_0492@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллифони: **Ином Шерович Норматов** – узви вобастаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, д.и.х., профессор, мудири кафедраи метеорология ва иқлимшиносии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. **Суроға:** 734025, Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Рӯдакӣ 17. **Тел.:** (+992 91) 817 73 90. **E-mail:** inomnor@gmail.com.

Абдусамад Эшонкул Ҳоджизода – докторанти PhD дар кафедраи метеорология ва иқлимшиносии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. **Суроға:** 734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёб. Рӯдакӣ, 17. **Тел.:** (+992 92) 633 05 88. **E-mail:** hojiev99@list.ru.

Фируз Алиҷон Шарофзода – мудири факултети № 5 дар Академияи Вазорати корҳои дохилии Ҷумҳурии Тоҷикистон. **Суроға:** 734024, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Мاستонгулов 3. **Тел.:** (+992 90) 432 20 22. **E-mail:** firuz_0492@mail.ru.

Information about the authors: **Inom Sherovich Normatov** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Tajikistan, - DSc in Chem., Professor, Head of the Department of Meteorology and Climatology at Tajik National University. **Address:** Rudaki Ave. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 91) 817 73 90. **E-mail:** inomnor@gmail.com.

Abdusamad Eshonkul Khodjizoda – PhD student at the Department of Meteorology and Climatology at Tajik National University. **Address:** Rudaki Ave. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 92) 633 05 88. **E-mail:** hojiev99@list.ru.

Firuz Alijon Sharofzoda – Head of Faculty No. 5 at the Academy of the Ministry of Internal Affairs the Republic of Tajikistan. **Address:** Mastongulov Str. 3, Dushanbe, Tajikistan, 734024. **Phone:** (+992 90) 432 20 22. **E-mail:** firuz_0492@mail.ru.

УДК: 54.05

МОДЕЛРОНИИ РАВАНДИ ИШҚОРОНИИ КОНСЕНТРАТИ СУРМАДОРИ КОНИ КОНЧОЧ

Самихзода Ш.Р.¹, Шамсиддинов А.И.², Шерзода Н.¹, Jiang Xiaohong³
Донишгоҳи миллии Тоҷикистон¹

Институти кимиёи ба номи В.И. Никитини

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон²

Донишгоҳи илм ва технологияи Нанкин³

Аннотатсия. Дар ин мақола ишқоронии сурма аз концентрати флотатсионии кони Кончоч ва моделроии раванди он баррасӣ мегардад. Қонуниятҳои асосии кинетикии таҷзияи концентрати флотатсионии кони Канчоч бо таъсири кислотаи хлорид омӯхта шуданд. Шароити оптималӣ барои ҷудо кардани сурма аз таркиби концентрат бо кислотаи хлорид муайян карда шуд: концентратсияи кислотаи хлорид 6 м/дм^3 ; давомнокии раванд 180 дақиқа; таносуби ҷисми сахт:моя $1:7$. Дар асоси маълумоти таҷрибавӣ, модели математикӣ барои муайян кардани дараҷаи ҷудошавии сурма ҳангоми ишқоронии концентрати флотатсионии сурмадори кони Канчоч пешниҳод карда мешавад.

Калидвожаҳо: дараҷаи ҷудошавӣ, технологияи кислотаи хлорид, флотатсия, давомнокии раванд, ишқоронии сурма, формулаи эмпирикӣ, усули квадратҳои хурдтарин.

Муқаддима

Дар амалияи ҷаҳонӣ ҳангоми коркарди маъданҳои оксидшавандаи душворфасли металҳои вазнини ранга тамоюли истифодаи усулҳои омехта, аз ҷумла амалиёти гидро-ё пирометаллургӣ дар маҷмӯъ бо флотатсия ё ғанигардонии гравитатсионӣ вобаста ба хусусиятҳои таркиби моддии маъданҳо мушоҳида мешавад [1].

Маъдани сурмадор вобаста ба таркиб ва хусусиятҳои минералиаш ба навъҳои зерин тақсим мешавад: маъданҳои сурмадори хос ва мураккаб. Дар таркиби маъданҳои сурма асосан оксидҳои сурма ва антимонит мавҷуданд, ки асосан бо стибиконит, валентинит, кермезит, гидроромеит ва ғайра ифода карда мешаванд. Минералҳои охирин ба маъданҳои минтақаи оксидшуда дохил мешаванд ва дар баробари сульфидҳо дар минтақаи омехтаи сулфидию оксидӣ конҳои сурма ҷойгиранд [2, 3].

Дар шароити лабораторӣ омӯзиши ишқоронии концентрати сурмадор таҳти омехтакунии пайваста гузаронида шуданд. Дарачаи ҷудошавии сурма аз концентрати флотатсионӣ дар ҳама таҷрибаҳо дар асоси таҳлили химиявии ашёи аввала ва маҳсулоти баъди ишқоронӣ муайян карда шуд.

Методҳои таҳқиқотӣ дар қори мазкур таъсири омилҳои гуногун дар ҳудудҳои васеи параметрҳо ба кушодашавии минералҳои концентрати қони Қанҷоч рағона шудааст. Таркиби химиявии концентрати флотатсионии сурмадори қони Қанҷоч нишон медиҳад, ки дар таркиби он Sb 38.6 ғоизро ташкил медиҳад. Дар таҳқиқот 60 % кислотаи хлорид истифода шудааст.

Вобастагии ҷудошавии сурма бо давомнокии рағанд то 180 дақиқа, ҳарорати 80°C , таносуби саҳт:моеъ 1:7 ва концентратсияи кислотаи хлорид 6 мол/л омӯхта шуд (ҷадвали 1).

Миқдори зиёди сурмаи ишқоронидашуда бо давомнокии рағанд 180 дақиқа, ҳарорати 80°C , таносуби саҳт:моеъ 1:7 ва концентратсияи кислотаи хлорид 6 мол/л мушоҳида карда шуд.

Дар ҷадвали 1 натиҷаҳои таҳқиқот дар суръати гуногуни ҷараёни хароҷоти кислотаи хлорид нишон дода шудааст, ки ҳангоми концентратсияи кислотаи хлорид 6 мол/л будан кушодашавии минералҳои концентрат мушоҳида мешавад.

Баррасии натиҷаҳои тадқиқот

Дар асоси технологияи таҳияшуда ва маълумоти бадастомада, кӯшиш карда шуд, ки модели математикии рағанди ишқоронии концентрати сурмадор аз қони Қанҷоч бо кислотаи хлорид таҳия карда шавад [4-7].

Ҷадвали 1. Натиҷаҳои таҳқиқот оид ба ишқоронии концентрати сурмадори
кони Канҷоч

№ р/т	Давом- нокӣ, дақиқа	Таносуби С:М	Ҳаро- рат, °С	Консент- ратсияи HCl, мол/л	Консентратсия дар маҳлул, мг/дм ³	Дараҷаи чудошавӣ дар маҳлул, %
					Sb	Sb
1	180	1:7	25	6	20072.1	36.4
2	-	-	30	-	24042.3	43.6
3	-	-	40	-	28233.1	51.2
4	-	-	50	-	32920.3	59.7
5	-	-	60	-	37717.7	68.4
6	-	-	70	-	43232.0	78.4
7	-	-	80	-	49352.8	89.5
8	-	-	90	-	50069.7	90.8
9	30	1:7	80	6	18693.4	33.9
10	60	-	-	-	23601.1	42.8
11	120	-	-	-	30108.0	54.6
12	140	-	-	-	35456.8	64.3
13	160	-	-	-	43673.1	79.2
14	180	-	-	-	50235.1	91.1
15	200	-	-	-	49959.4	90.6
16	240	-	-	-	50731.4	92,0
17	180	1:7	80	1	20016.8	36.3
18	-	-	-	2	25365.7	46.0
19	-	-	-	3	30769.7	55.8
20	-	-	-	4	38214.0	69.3
21	-	-	-	5	45492.8	82.5
22	-	-	-	6	50290.3	91.2
23	-	-	-	7	50621.1	91.8

24	-	-	-	8	50952.0	92.4
25	180	1:3	80	6	18583.1	33.7
26	-	1:4	-	-	23766.6	43.1
27	-	1:5	-	-	30880.0	56.0
28	-	1:5	-	-	36008,3	65.3
29	-	1:6	-	-	43618.0	79.1
30	-	1:7	-	-	50510.8	91.6
31	-	1:8	-	-	50896.8	92.3
32	-	1:9	-	-	50400.6	91.4

Ишораҳо ворид мекунем: x_1 – ҳарорат, $^{\circ}\text{C}$; x_2 – давомнокии раванд, дақиқа; x_3 – консентратсияи HCl , мол/л; y – дараҷаи ҷудошавии сурма дар маҳлул, %.

Гузориши масъала. Вобастагии дараҷаи ҷудошавӣ дар маҳлул аз ҳарорат дар асоси маълумотҳои таҷрибавии дар ҷадвали 2 овардашуда муайян карда мешавад.

Ҷадвали 2. Вобастагии дараҷаи ҷудошавӣ дар маҳлул аз ҳарорат

x_1	25	30	40	50	60	70	80	90	Φ_{MT}
y_1	36.4	43.6	51.2	59.7	68.4	78.4	89.5	90.8	
$y_{\text{ҳисобӣ}}$	22.0	26.4	35.2	44.0	52.7	61.5	70.3	79.1	
Ҷоизҳои тамоил	-39.6	-39.4	-31.2	-26.3	-23.0	-21.6	-21.5	-12.9	26.9

Барои муайян кардани модели ин вобастагӣ аз методи миёнаҳо истифода мекунем. Ҳангоми гузориши нуктаҳои (x_1, y) дар системаи координатҳои xOy тақрибан хати рост ҳосил мешавад. Бинобар ин, нуктаҳоро ба муодилаи хати рост

$$y = ax + b \quad (1)$$

гузошта, ҳашт муодила ҳосил мекунем. Онҳоро ба ду гурӯҳ тақсим карда, дар алоҳидагӣ месуммиронем. Ду муодилаи ҳосилшуда якҷоя ҳал карда, параметрҳои a ва b ёфта мешаванд [8].

$$\begin{array}{l}
\text{Гурӯҳи I} \\
25 a + b = 36,4 \\
30 a + b = 43,6 \\
+ 40 a + b = 51,2 \\
50 a + b = 59,7
\end{array}$$

$$143 a + 4 b = 190,9$$

Он гоҳ,

$$\begin{cases} 145 a + 4 b = 190,9, \\ 300 a + 4 b = 327,1. \end{cases}$$

$$\begin{array}{l}
\text{Гурӯҳи II} \\
60 a + b = 68,4 \\
70 a + b = 78,4 \\
+ 80 a + b = 89,5 \\
90 a + b = 90,8
\end{array}$$

$$300 a + 4 b = 327,1$$

Ин ҷо, бо осонӣ a ва b ёфта мешавад. Аъзо ба аъзо аз муодилаи якум дуюм тарҳ мекунем:

$$-155 a = -136,2$$

$$a \approx 0,8787.$$

Қимати a -ро ба муодилаи якум мегузорем:

$$145 \cdot 0,8787 + b = 190,9$$

$$4b = 190,9 - 127,4115$$

$$b = 63,4885$$

$$b \approx 15,8721.$$

Пас, модел чунин намуд дорад:

$$y = 0.8787x_1 + 15.8721. \quad (2)$$

Аз рӯи қиматҳои додашудаи x_1 , $y_{\text{ҳисобӣ}}$ ёфта шуда, фоизҳои тамоил дар нуқтаҳои алоҳида, аз баробарии

$$(y_{\text{ҳисобӣ}} - y_{\text{таҷрибавӣ}}) \cdot \frac{100\%}{y_{\text{таҷрибавӣ}}}$$

ҳисоб карда мешавад. Ҳисобҳо дар ҷадвали 1 оварда шудааст.

Барои зуд сохтани модели вобастагӣ, ҳангоми на он қадар калон будани шумораи нуқтаҳо, барои ёфтани параметрҳои номаълум, методи нуқтаҳои интихобшуда истифода бурда мешавад. Ҷояи метод чунин аст: координатаҳои ду нуқта дар ибтидо ва охири хатти рост (25; 36,4) ва (90; 90,8) гирифта шуда, ба муодилаи (1) гузошта мешавад:

$$\begin{cases} 25a + b = 36,4, \\ 90a + b = 90,8. \end{cases}$$

Аз муодилаи якум дуомашро аъзо ба аъзо тарҳ мекунем:

$$-65a = -54,4$$

$$a \approx 0,8369.$$

Онро ба муодилаи якум гузошта, параметри b -ро меёбем:

$$25 \cdot 0,8369 + b = 36,4$$

$$20,9225 + b = 36,4$$

$$b = 4775.$$

Ҳамин тавр,

$$y = 0,8369x_1 + 15,4775. \quad (3)$$

Аз рӯи қиматҳои додашудаи x_1 , $y_{\text{ҳисобӣ}}$ ҳисоб карда шуда, фоизҳои тамоил низ дар ҷадвали 3 оварда шудаанд.

Ҷадвали 3. Натиҷаи фоизҳои тамоил

x_1	25	30	40	50	60	70	80	90	$\Phi_{\text{мт}}$
$y_{\text{ҳисобӣ}}$	36.4	40.6	49.0	57.3	65.7	74.1	82.4	90.8	
фоизҳои тамоил	0	-6.9	-4.3	-4.0	-3.9	-5.5	-7.9	0	4.1

$\Phi_{\text{мт}}$ — фоизи миёнаи тамоил.

Барои интихоби параметрҳо дар модел, методи универсалӣ - ин методи квадратҳои хурдтарин мебошад. Моҳияти метод чунин аст: фарқи $y_i - \hat{y}_i$ — ро дида мебароем, ки y_i — ординатҳои аз формулаи (1) ҳисоб кардашуда буда, y_i — ординатаҳои нуқтаҳои таҷрибавӣ аст. Параметрҳои a ва b тавре гирифта мешавад, ки суммаи квадрати он фарқ минималӣ гардад:

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Ин ҷо $y_i = ax_i + b$ гирифта шудааст. Барои иҷрои шарт ҳосилаҳои хусусии (4) нисбат ба a ва b гирифта шуда, онҳо ба сифр баробар карда мешаванд. Сипас, системаи ду муодилаи ҳосилшуда ҳал карда шуда, параметрҳо ёфта мешаванд:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad (5)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (6)$$

Барои ёфтани a ва b қадвали ёрирасони зеринро тартиб медиҳем:

Қадвали 4. Натиҷаи ҳисобҳои ёрирасон

	x_1	y	x_1^2	$x_1 \cdot y$
	25	36,4	625	910
	30	43,6	600	1308
	40	31,2	1600	2408
	50	59,7	2500	2985
	60	68,4	3600	4104
	70	78,4	4900	5488
	80	89,5	6400	7160
	90	90,8	8100	8172
Σ :	445	518	28625	32535

Сумаҳои ҳосилшударо ($n=8$) ба баробариҳои (5) ва (6) гузошта, параметрҳои a ва b -ро меёбем:

$$a = \frac{8 \cdot 32535 - 445 \cdot 518}{8 \cdot 28625 - (445)^2} = \frac{260280 - 230510}{229000 - 198025} = \frac{29770}{30975} \approx 0,9611;$$

$$b = \frac{28625 \cdot 518 - 445 \cdot 32535}{30975} = \frac{14827750 - 14478075}{30975} = \frac{349675}{30975} \approx 11,2889.$$

Он гоҳ, чунин модели вобастагии дараҷаи ҷудошавӣ дар маҳлул аз ҳарорат ҳосил карда шуд:

$$y = 0,9611x_1 + 11,2889. \quad (7)$$

Дар ҷадвали 6 қиматҳои аз вобастагии (7) ҳосилкардашудаи $U_{\text{ҳисобӣ}}$ ва
 Ҷоизҳои тамоил дар ҳар як нуқта оварда шудааст.

Ҷадвали 5. Натиҷаи Ҷоизҳои тамоил

x_1	25	30	40	50	60	70	80	90	$\Phi_{\text{мт}}$
$U_{\text{ҳисобӣ}}$	35.3	40.1	49.7	59.3	69.0	78.6	88.2	97.8	
Ҷоизҳои тамоил	-3.0	-8.0	-2.9	-0,7	+0.9	+0.3	-1.4	+7,7	3,1

1. Моделҳои вобастагии дараҷаи ҷудошавии сурма дар маҳлул аз
 давомнокии раванд.

Маълумотҳои таҷрибавӣ дар ҷадвали 6 оварда шудааст.

Ҷадвали 6. Вобастагии дараҷаи ҷудошавии сурма дар маҳлул
 аз давомнокии раванд

x_2	30	60	120	140	160	180	200	240	$\Phi_{\text{мт}}$
y	33.9	42.8	54.6	64.3	79.2	91.1	90.6	92.0	
$U_{\text{ҳисобӣ}}$	27.9	38.8	60.8	68.1	75.4	82.7	90.1	104.7	
Ҷоизҳои тамоил	-17.7	-9.3	-11.4	-5.9	-4.8	-9.2	-0.6	13.8	9.1

Ёфтани параметрҳои a ва b дар формулаи (1):

а) бо истифода аз методи миёнаҳо:

Гурӯҳи I

$$30 a + b = 33,9$$

$$60 a + b = 42,8$$

$$+ 120 a + b = 54,6$$

$$140 a + b = 64,3$$

$$350 a + 4 b = 195,6$$

Гурӯҳи II

$$160 a + b = 79,2$$

$$180 a + b = 91,1$$

$$+ 200 a + b = 90,6$$

$$240 a + b = 92,0$$

$$780 a + 4 b = 352,9$$

Пас,

$$\begin{cases} 350a + 4b = 195,6, \\ 780a + 4b = 352,9. \end{cases}$$

Системаро ҳал карда, меёбем: $a \approx 0,3658$; $b \approx 16,8925$.

Ҳамин тавр модел чунин ифода карда мешавад:

$$y = 0,3658x_2 + 16,8925. \quad (8)$$

Дар ҷадвали 4 $y_{\text{ҳисобӣ}}$ ва фоизҳои тамоил оварда шудааст.

б) бо истифода аз методи нуқтаҳои интихобшуда:

$$\begin{cases} 30a + b = 33,9, \\ 240a + b = 92,0. \end{cases}$$

Ҳалли ин система $a \approx 0,2767$;

$b \approx 25,599$ ва модел чунин ифода карда мешавад:

$$y = 0,2767x_2 + 25,599. \quad (9)$$

Дар модели (9) қиматҳои таҷрибавии x_2 -ро гузошта, $y_{\text{ҳисобӣ}}$ ва фоизҳои тамоил ёфта шуда, дар ҷадвали 7 оварда мешавад.

Ҷадвали 7. Натиҷаи фоизҳои тамоил

x_2	30	60	120	140	160	180	200	240	$\Phi_{\text{мт}}$
$y_{\text{ҳисобӣ}}$	33.9	42.2	58.8	64.3	69.9	75.4	80.9	92.0	
фоизҳои тамоил	0	-1.4	+7.7	0	-11.7	-17.2	-10.7	0	6.1

в) бо истифода аз методи квадратҳои хурдтарин: ҷадвали ёрирасонро тартиб медиҳем

Ҷадвали 8. Натиҷаи ҳисобҳои ёрирасон

x_2	y	x_2^2	$x_2 \cdot y$
30	33,9	900	1017
60	42,8	1600	2568
120	54,6	14400	6552
140	64,3	19600	9002
160	79,2	25600	12672
180	91,1	32400	16398
200	90,6	40000	18120
240	92,0	57600	22080
Σ :	1130	548,5	194100
			88409

Сумаҳои ҳосилшударо ба баробарии (5) ва (6) гузошта ($n=8$) параметрҳои a ва b , инчунин модели вообастагии y -ро аз x_2 меёбем:

$$a \approx 0,317; \quad b \approx 23,7828.$$

$$y = 0,317x_2 + 23,7828. \quad (10)$$

Қиматҳои y барои нуқтаҳои таҷрибавии x_2 , инчунин фоизҳои тамоил дар нуқтаҳо ҳисоб карда, дар ҷадвали 9 оварда шудааст.

Ҷадвали 9. Натиҷаи фоизҳои тамоил

x_2	30	60	120	140	160	180	200	240	Φ_{MT}
$U_{\text{ҳисобӣ}}$	33.3	42.8	61.8	68.2	74.5	80.8	87.2	99.9	
Фоизҳои тамоил	-1.8	0	+13.2	+6.1	-5.9	-11.3	-3.8	+8.6	6.3

Хулоса

Ҳамин тавр, коркарди модели математикӣ барои муайян кардани дараҷаи ҷудошавии сурма ҳангоми ишқоронии концентрати флотатсионии сурмадори

кони Канчоч, ки имконияти назорати параметрҳои раванди технологиро фароҳам месозад.

Литература

1. Соложенкин П.М. Технология обогащения и переработки золотосурьмяных руд и концентратов / Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья. Под ред. В. А. Чантурия. – М.: Изд. Дом: Руда и металлы. – 2008. – С. 112 -119.
2. Шамсиддинов А.И. Разработка технологии обогащения сульфидной сурьмяно-золотосодержащих руд / А.И. Шамсиддинов, М.С. Исмоилова, Ш.Р. Самихзода // Вестник Филиала Московского государственного университета имени В.И. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных и геологических наук. – 2025. – Т. 1. – № 3 (49). – С. 82-92.
3. Самихзода Ш.Р. Разработка технологической схемы обогащения сульфидных сурьмяно-золотосодержащих руд / Самихзода Ш.Р., Шамсиддинов А.И., Сорбони Саидчалол // Вестник Дангаринского государственного университета. Серия естественных наук. – 2025. – № 3 (33). – С. 112-119.
4. Самихов Ш.Р. Математическое моделирование хлоридовозгоночного обжига концентрата месторождения Чоре / Ш.Р. Самихов, З.А. Зинченко, Н. Шерматов // Известия АН Республики Таджикистан: Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. – 2013. – Т. 152. – № 3. – С. 78-85.
5. Самихов Ш.Р. Исследование и разработка математических моделей процесса кучного (отвального) выщелачивания бедных руд / Ш.Р. Самихов, З.А. Зинченко, Н. Шерматов // Вестник Таджикского национального университета. – 2016. – № 1/3 (200). – С. 172-180.
6. Солехова Г.Н. Процесс моделирования азотнокислотного выщелачивания медьсодержащих концентратов месторождения Тарор / Г.Н. Солехова, Ш.Р. Самихов, Н. Шерматов // Политехнический Вестник. Серия инженерные исследования. – 2024. – № 1 (65). – С. 107-112.
7. Самихзода Ш.Р. Моделирование процесса хлоридовозгоночного обжига

серебро-свинцово-цинкового концентрата месторождения Большой Конимансур / Ш.Р. Самихзода, А.Т. Исоева, Чао Ли, А.И. Шамсиддинов, Н. Шерзода // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2026. – № 2. – С. 265-276.

8. Амонуллоев А. Шерматов Н. Омори математикӣ (Математическая статистика) / – Душанбе: Сино, 2014. – 624 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ КОНЦЕНТРАТА КОНЧОЧСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Самихзода Ш.Р.¹, Шамсиддинов А.И.², Шерзода Н.¹, Jiang Xiaohong³

Таджикский национальный университет¹

Институт химии имени В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана²

Нанкинский университет науки и технологий³

Аннотация. В данной статье рассматривается процесс выщелачивания сурьмы из флотационного концентрата Канчочского месторождения и моделирование его процесса. Изучены основные кинетические закономерности разложения флотационного концентрата Канчочского месторождения под воздействием соляной кислоты. Определены оптимальные условия извлечения сурьмы от концентрата соляной кислотой: концентрация соляной кислоты 6 м/дм³; продолжительность процесса 180 минут; соотношение твёрдое вещество:жидкость 1:7. На основе экспериментальных данных предложена математическая модель для определения степени извлечения сурьмы при выщелачивании сурьмосодержащего флотационного концентрата Канчочского месторождения.

Ключевые слова: степень извлечения, солянокислотная технология, флотация, продолжительность процесса, щелочное выщелачивание сурьмы, эмпирическая формула, метод наименьших квадратов.

MODELING THE LEACHING PROCESS OF KONCHUCH DEPOSIT CONCENTRATE

Sh.R. Samihzoda¹, A.I. Shamsiddinov², N. Sherzoda¹ Jiang Xiaohong³

Tajik National University¹

Annotation. *This article discusses the leaching of antimony from the Konchoch deposit flotation concentrate and its modeling. The main kinetic patterns of the decomposition of the Kanchoch deposit flotation concentrate under the influence of hydrochloric acid are studied. Optimum conditions for antimony extraction from the concentrate with hydrochloric acid are determined: hydrochloric acid concentration of 6 m/dm³; process duration of 180 minutes; solid : liquid ratio of 1 : 7. Based on experimental data, a mathematical model is proposed for determining the degree of antimony extraction during leaching of antimony-containing flotation concentrate from the Kanchoch deposit.*

Keywords: *extraction degree, hydrochloric acid technology, flotation, process duration, alkaline leaching of antimony, empirical formula, least squares method.*

Маълумот дар бораи муаллифон: Самихзода Шонаврӯз Раҳим – д.и.т., профессори кафедраи технологияи истеҳсолоти химиявии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. **Суроға:** 734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Рудақӣ, 17. **Тел.:** (+992 93) 338 02 04. **E-mail:** samikhov72@mail.ru.

Шамсиддинов Асхобиддин Исомиддинович – докторанти PhD-и Институти кимиёи ба номи В.И. Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон. **Суроға:** 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, Душанбе, х. Айнӣ, 299/2. **Тел.:** (+992 97) 648 59 95. **E-mail:** ashobiddinshamsiddinov@gmail.com.

Шерзода Нурмахмад – д.и.т., профессори кафедраи математикаи ҳисоббарорӣ ва механикаи Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. **Суроға:** 734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Рудақӣ, 17. **Тел.:** (+992 90) 402 73 07. **E-mail:** nurmakhmad.shermatov@mail.ru.

Jiang Xiaohong – профессори Донишгоҳи илм ва технологияи Нанкин. **Суроға:** 210094, Хитой ш. Нанкин, к. Сяолинвэй, 200. **Тел.:** (+86 25) 84 31 52 33. **E-mail:** jiangxh24@njust.edu.cn.

Сведения об авторах: Самихзода Шонаврӯз Раҳим – д.т.н., профессор кафедри технологии химического производства Таджикского национального университета. **Адрес:** 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17. **Тел.:** (+992 93) 338 02 04. **E-mail:** samikhov_72@mail.ru

Шамсиддинов Асхобиддин Исомиддинович – докторант PhD Института химии имени В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана. **Адрес:** 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Аини 299/2. **Тел.:** (+992 97) 648 59 95. **E-mail:** shermatov@mail.ru.

Шерзода Нурмахмад – д.т.н., профессор кафедры вычислительной математики и механики Таджикского национального университета. **Адрес:** 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17. **Тел.:** (+992 90) 402 73 07. **E-mail:** nurmakhmad.shermatov@mail.ru.

Jiang Xiaohong – профессор Нанкинского университета науки и технологии. **Адрес:** 210094, Китай, г. Нанкин, ул. Сяолинвэй, 200. **Тел.:** (+86 25) 84 31 52 33. **E-mail:** jiangxh24@njust.edu.cn.

Information about the authors: **Samizoda Shonavruz Rahim** – DSc in Tech. (engineering), Professor, Department of Chemical Production Technology of the Tajik National University. **Address:** Rudaki Aven. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 93) 338 02 04. **Email:** samikhov_72@mail.ru.

Shamsiddinov Askhobiddin Isomiddinovich – PhD student of the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan. **Address:** Ayni Ave., 299/2, Dushanbe, Tajikistan, 734063. **Phone:** (+992 97) 648 59 95. **E-mail:** ashobiddinshamsiddinov@gmail.com.

Sherzoda Nurmahmad – DSc in Tech. (engineering), Professor, Department of Computational Mathematics and Mechanics of the Tajik National University. **Address:** Rudaki Ave. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 90) 402 73 07. **E-mail:** nurmakhmad.shermatov@mail.ru.

Jiang Xiaohong – Professor at Nanjing University of Science and Technology. **Address:** 200 Xiaolingwei Road, Nanjing, China, 210094. **Phone:** (+86 25) 84 31 52 33. **E-mail:** jiangxh24@njust.edu.cn.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЁМКОСТИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СПЛАВА $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$, ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

Улфатов С.Э.¹, Ганиев И.Н.², Амонова А.В.², Саидзода М.М.³

Дангаринский государственный университет¹

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими²

*«Академия туризма» Государственного учреждения «Международный
университет туризма и предпринимательства Таджикистана»³*

Аннотация. Многокомпонентные сплавы системы $Zn-Al-Ni$ представляют собой класс перспективных функционально-конструкционных материалов, востребованных в точном приборостроении, электротехнике и при производстве износостойких антикоррозионных покрытий. В современной металлургии цветных металлов интерес к базовому сплаву $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$ обусловлен поиском путей повышения его термодинамической стабильности и термической стойкости в условиях циклических тепловых нагрузок. Микролегирование скандием — переходным редкоземельным элементом с высоким сродством к кислороду — открывает новые возможности для модифицирования структурно-фазового состояния и направленного регулирования теплофизических свойств данных систем. В настоящей работе прецизионным динамическим методом «охлаждения» относительно реперного эталона из высокочистого цинка впервые определена температурная зависимость удельной изобарной теплоемкости и рассчитаны приращения интегральных термодинамических функций (энтальпии, энтропии и свободной энергии Гиббса) цинкового сплава $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$, легированного скандием. Установлено, что в интервале температур 300–600 К введение скандия (до 1.0 масс. %) приводит к монотонному снижению абсолютных значений теплоемкости, энтальпии и энтропии исходной матрицы. На основе нелинейного регрессионного анализа получены эмпирические температурные полиномы, описывающие термодинамические характеристики исследованных сплавов с высокой степенью достоверности.

Ключевые слова: цинковый сплав $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$, скандий, микроструктура, удельная изобарная теплоёмкость, метод охлаждения, цинк марки ХЧ, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, термодинамические функции.

Введение

В условиях интенсификации рабочих режимов промышленного оборудования, точного приборостроения и энергетического машиностроения особую актуальность приобретает создание конструкционных и функциональных материалов, сочетающих в себе высокий уровень механической прочности, технологической пластичности, коррозионной стойкости и стабильного теплофизического поведения в широком интервале температур.

История освоения цинковых сплавов как износостойких и защитных материалов неразрывно связана с развитием методов противокоррозионной защиты металлоконструкций от агрессивных атмосферных и жидкостных сред. Сплавы системы Zn–Al, традиционно известные в мировой практике под марками типа Zamak или ЦАМ, на протяжении десятилетий доказывали свою высокую эффективность благодаря сочетанию превосходной жидкотекучести, относительно низкой температуры плавления и выраженных протекторных свойств. Тем не менее жесткие требования современной техники к надежности материалов в условиях повышенных температурных и циклических механических нагрузок привели к необходимости перехода от бинарных систем к более сложным, многокомпонентным гетерофазным композициям [1-5].

Сплав состава **Zn1Al0.5Ni** представляет собой результат закономерной эволюции классических цинк-алюминиевых эвтектических систем. Введение никеля в состав алюминиево-цинковой матрицы позволяет значительно модифицировать кристаллическую структуру литейного происхождения. Никель, образуя дисперсные интерметаллидные фазы на границах раздела, измельчает дендритный контур твердого раствора и существенно повышает сопротивление материала ползучести, что сделало данный сплав востребованным в узлах трения, деталях автомобильной индустрии и прецизионной электротехнике. В современной промышленности интерес к системе Zn1Al0.5Ni вышел на новый уровень: она рассматривается как перспективный базис для создания высокоэффективных функциональных

покрытий и элементов энергетических установок, подвергающихся знакопеременным температурным воздействиям.

Дальнейшее регулирование служебных характеристик и повышение термической стабильности сплава $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$ может быть достигнуто путем его дополнительного микролегирования переходными редкоземельными металлами, в частности скандием (Sc). Облагая высокой химической активностью и специфическим характером взаимодействия с компонентами матрицы, скандий способен изменять кинетику фазообразования при кристаллизации, измельчать эвтектические составляющие и блокировать границы зерен дисперсными интерметаллидами. Однако для успешного прогнозирования эксплуатационного ресурса и термодинамической стабильности модифицированных сплавов необходимо детальное знание их теплофизических параметров.

Фундаментальной характеристикой, определяющей фазовую устойчивость гетерогенных металлических систем, является температурная зависимость их теплоёмкости. Экспериментальное определение политерм теплоёмкости позволяет строго рассчитать базовые термодинамические функции (энтальпию, энтропию, энергию Гиббса), знание которых критически важно для математического CALPHAD-моделирования многокомпонентных систем.

Особое место в процессах фазового модифицирования и структурного инжиниринга многокомпонентных легкоплавких систем занимает скандий. Являясь уникальным переходным редкоземельным металлом, скандий обладает колоссальным химическим сродством к кислороду и элементам матрицы, а также способностью к направленному термодинамическому перераспределению примесных фаз и газов по межзеренным границам. Легирование скандием открывает широкие возможности для контролируемого изменения кинетики кристаллизации, измельчения эвтектических составляющих и целенаправленного улучшения макроскопических теплофизических и калориметрических характеристик материала [6-10].

Несмотря на очевидную научно-практическую значимость систем Zn–Al–Ni, экспериментальные данные о политермах удельной теплоёмкости и приращениях интегральных термодинамических функций (энтальпии, энтропии, свободной энергии Гиббса) для скандийсодержащих сплавов в мировой литературе до настоящего времени представлены фрагментарно. Отсутствие фундаментального калориметрического базиса существенно затрудняет математическое моделирование фазовых равновесий, оценку кинетики термического старения и прогнозирование эксплуатационного ресурса изделий.

Теплофизические и механические свойства многокомпонентных сплавов на основе цинка, такие как изобарная теплоёмкость (C_p), термическое расширение, плотность, тепло- и температуропроводность, являются важнейшими физико-химическими характеристиками, определяющими поведение данных материалов при различных внешних термических воздействиях. До настоящего времени подобные сведения для сложнолегированных цинковых систем носят разрозненный и часто противоречивый характер. Практически полностью отсутствуют систематизированные данные, необходимые для установления корреляций между фундаментальными термодинамическими величинами и кинетикой фазовых переходов в конденсированном состоянии, что сдерживает развитие промышленных технологий их высокотемпературного применения.

Термодинамический анализ существенно усложняется гетерогенным (многофазным) характером исследуемых сплавов системы Zn–Al–Ni–Sc. Термическое воздействие на гетерогенные поликристаллические структуры в политермических условиях сопровождается смещением точек фазового равновесия и перераспределением компонентов между сосуществующими фазами согласно диаграмме состояния [11-16].

Данные фазовые микропереходы вносят дополнительный вклад в общую теплоёмкость конденсированной системы. Вследствие этого эффективная теплоёмкость гетерогенного сплава не подчиняется закону аддитивности (правилу Вегарда–Неймана–Коппа), а превосходит сумму теплоемкостей

изолированных составляющих фаз, испытывая характерные скачки при переходе от гомогенного состояния к области существования гетерогенной смеси [17-19].

Исходя из вышеизложенного, **целью** данной работы является экспериментальное определение температурной зависимости удельной изобарной теплоемкости и аналитический расчет приращений интегральных термодинамических функций (изменения энтальпии, энтропии и свободной энергии Гиббса) сложнолегированного цинкового сплава Zn1Al0.5Ni , модифицированного скандием, в динамическом режиме калориметрического охлаждения.

В связи с этим настоящее исследование посвящено прецизионному экспериментальному изучению влияния легирования скандием на структурно-фазовое состояние, твёрдость и температурную зависимость удельной изобарной теплоёмкости сплава Zn1Al0.5Ni в высокотемпературной области.

Теория метода и методика измерения

Экспериментальное определение политермической зависимости удельной изобарной теплоемкости конденсированных фаз является фундаментальной основой для комплексного анализа фазовой стабильности, дефектной структуры и термодинамической устойчивости многокомпонентных металлических систем. В настоящей работе калориметрические измерения осуществлялись на экспериментальном комплексе, функционирующем по принципу динамического С-калориметра с адиабатической оболочкой и интегрированным тепломером (принципиальная схема измерительной ячейки приведена на рис. 1).

Для верификации измерительного тракта, калибровки датчиков теплового потока и минимизации систематической приборной погрешности использовался реперный эталон сравнения, изготовленный из высокочистого цинка марки ХЧ (чистотой не менее 99.99 масс. % по ГОСТ 3640-94), термодинамические функции которого стандартизированы и верифицированы в широком температурном интервале.

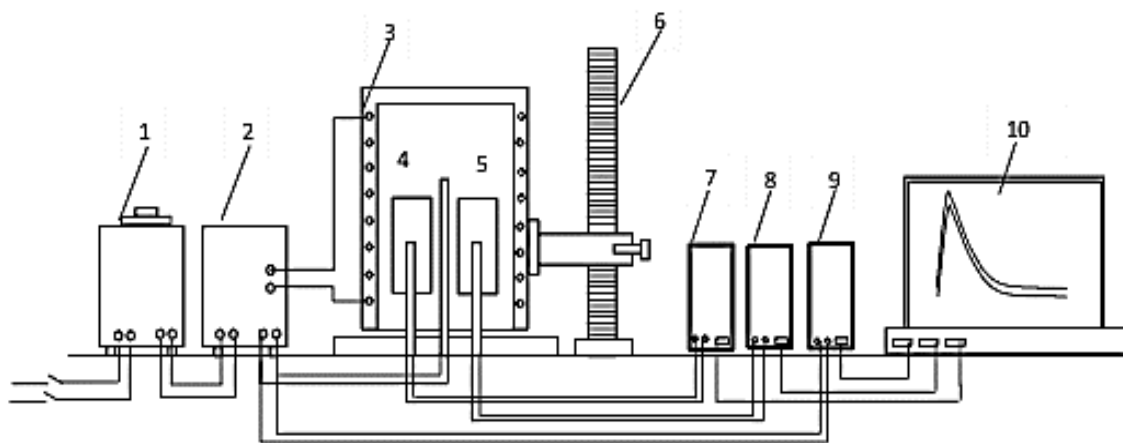


Рисунок 1. Установка для определения теплоёмкости твёрдых тел в режиме охлаждения: 1-автотрансформатор; 2-терморегулятор; 3-электропечь; 4-образец измеряемый; 5-эталон; 6-стойка электропечи; 7-цифровой термометр измеряемого образца; 8-цифровой термометр общего назначения; 9-цифровой термометр эталона; 10-регистрационный прибор.

Используемый экспериментальный стенд включает в себя вертикальную трубчатую электропечь сопротивления (3), смонтированную на подвижной направляющей стойке (6), и систему прецизионного регулирования температуры на базе лабораторного автотрансформатора (1) и микропроцессорного цифрового терморегулятора (2).

Образцы исследуемых многокомпонентных сплавов системы Zn–Al–Ni–Sc и реперный эталон (5) изготавливались в виде геометрически идентичных цилиндров длиной 30 ± 0.1 мм и диаметром 16 ± 0.1 мм. В торцевой части каждого цилиндра формировались глухие осевые каналы для позиционирования рабочих спаев хромель-алюмелевых (ХА) термопар (4, 5). Сбор, непрерывная регистрация и архивация температурных данных осуществлялись в автоматическом режиме с помощью прецизионных цифровых многоканальных термометров (7–9), сопряженных с персональным компьютером (10) через соответствующий интерфейс сбора данных.

Процедура эксперимента заключалась в одновременном нагреве исследуемого образца и эталона (высокочистый цинк марки ХЧ) в изотермической зоне электропечи до заданной целевой температуры. По

достижении теплового равновесия в измерительной ячейке образцы синхронно выводились из зоны нагрева, после чего в режиме реального времени регистрировались кинетические кривые их монотонного охлаждения с фиксированным шагом дискретизации по времени $\Delta\tau = 10$ с. Калориметрический процесс фиксировался до достижения нижней контрольной температуры (308 K).

Расчёт удельной изобарной теплоёмкости исследуемых сплавов ($C_{p_2}^0$) базировался на фундаментальном законе сохранения энергии и решении уравнения теплового баланса для квазистационарного режима охлаждения двух тел в идентичных граничных условиях. Расчетная формула имеет следующий вид:

$$C_{p_2}^0 = C_{p_1}^0 \frac{m_1 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{m_2 \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \quad (1)$$

где $m_1 = \rho_1 \cdot V_1$; $m_2 = \rho_2 \cdot V_2$ - массы эталона и измеряемых образцов, $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$ и $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$ - скорости их охлаждения.

Исследование удельной изобарной теплоёмкости и приращений интегральных термодинамических функций сложнолегированных сплавов системы Zn–Al–Ni, модифицированных скандием, осуществляли по верифицированной методике, подробно описанной в работах [20-22].

Для синтеза экспериментальных образцов использовались высокочистые исходные компоненты: цинк марки ХЧ (чистотой не менее 99.99 масс. % по ГОСТ 3640-94), первичный алюминий марки А5 (по ГОСТ 11069-2019) и металлический никель (по ГОСТ 849-2018). В качестве модифицирующей добавки применялся металлический скандий марки СкМ-1 ТУ 48-4-483-87 (по действующим техническим условиям).

Плавку исходных компонентов проводили в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ в алундовых тиглях под слоем защитного флюса. С целью обеспечения высокого уровня гомогенизации и равномерного распределения тугоплавких компонентов в объеме расплава предварительно синтезировали двойные мастер-сплавы (лигатуры) систем Zn–Ni и Zn–Al.

Скандий вводили в гомогенизированный базовый расплав в составе предварительно подготовленной лигатуры Zn–Sc.

Из полученных многокомпонентных расплавов после тщательного механического перемешивания и снятия шлака производили заливку в массивные графитовые изложницы (или металлические кокили) для получения цилиндрических заготовок диаметром 16 мм и длиной 30 мм (рис. 2). Для детального изучения концентрационной зависимости влияния скандия на структурные и теплофизические свойства базового сплава Zn1Al0.5Ni была синтезирована серия образцов с содержанием модификатора в диапазоне 0.01–0.5 масс. %.

Контроль химического состава синтезированных многокомпонентных сплавов осуществлялся методами оптико-эмиссионного спектрального анализа в аккредитованной центральной заводской лаборатории ГУП «Таджикская алюминиевая компания» (ТАЛКО). Дополнительный гравиметрический контроль выполняли путем сопоставления исходной массы расчетной шихты и фактической массы полученного литого слитка. К дальнейшим калориметрическим и структурным исследованиям допускались только те образцы, относительное отклонение массы которых от расчетных значений шихтовки не превышало $\pm 2\%$.

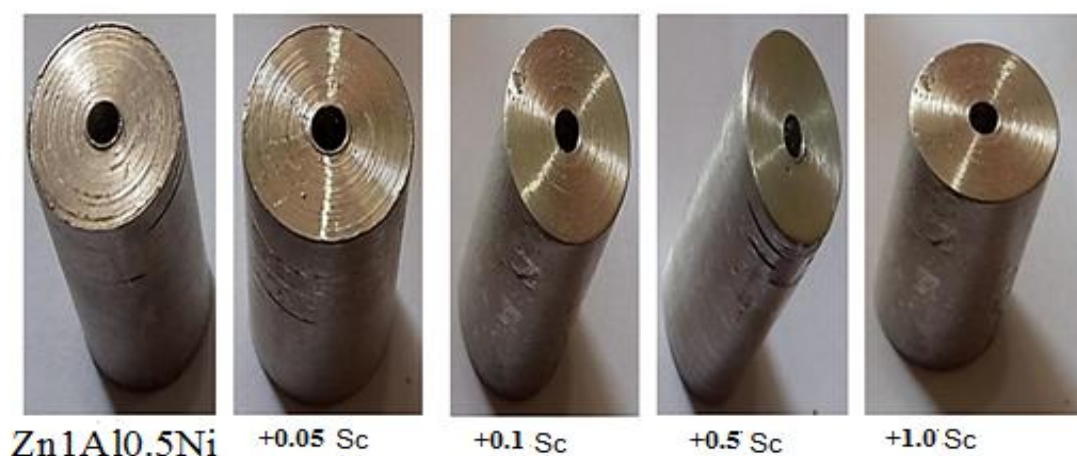


Рисунок 2. Образцы из цинкового сплава ZnAl1Ni0.5, легированного скандием

Экспериментальное определение удельной изобарной теплоёмкости базировалось на анализе кинетических кривых охлаждения исследуемых образцов, представляющих собой функциональную зависимость температуры от времени в условиях стационарного радиационно-конвективного теплообмена с окружающей средой. Типичные экспериментальные политермы охлаждения для базового сплава $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$ и образцов, легированных скандием, приведены на рис. 3а.

Автоматическая регистрация температурных данных осуществлялась с инструментальной дискретностью 0.1 К при постоянном шаге фиксации временных интервалов $\Delta\tau=10$ с. Расчёт инструментальной и методической погрешностей калориметрических измерений показал, что относительная погрешность определения эффективной теплоёмкости в исследуемом температурном интервале не превышала $\pm 1.0\%$, что полностью удовлетворяет жёстким метрологическим требованиям, предъявляемым к прецизионной динамической калориметрии твёрдых тел.

Математическая обработка полученных экспериментальных массивов данных, сглаживание кинетических кривых и их последующая нелинейная аппроксимация выполнялись с использованием пакетов прикладных программ статистического анализа. Статистическая обработка температурно-временных зависимостей подтвердила высокую сходимость выбранной математической модели: среднеквадратичный коэффициент детерминации (R^2) для всех расчётных полиномов охлаждения составил не менее 0.999.

Экспериментальные политермы охлаждения описываются двух экспоненциальной зависимостью следующего вида:

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}. \quad (2)$$

где a , b , p , k - эмпирические коэффициенты, постоянные для каждого конкретного состава образца, а τ — фиксируемое время охлаждения.

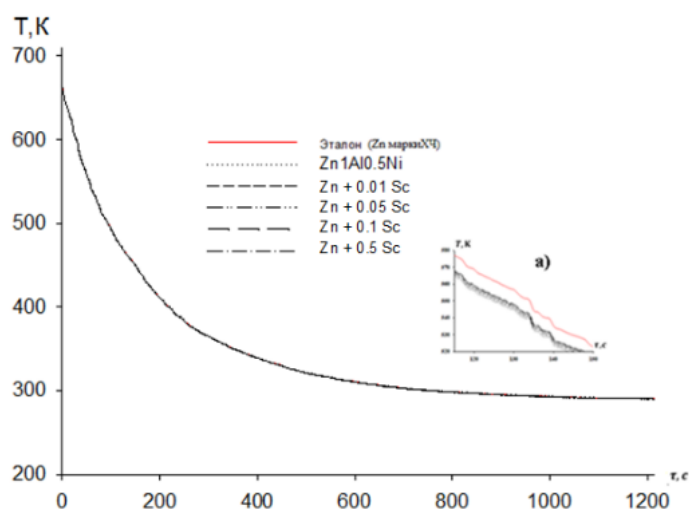
Путём аналитического дифференцирования функциональной зависимости (2) по временной переменной τ были получены уравнения для точного определения мгновенных скоростей охлаждения исследуемых объектов:

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (3)$$

Численные значения коэффициентов аппроксимирующих уравнений (2), рассчитанные методом наименьших квадратов (МНК), систематизированы в таблице 1. Характер изменения политерм скоростей охлаждения в зависимости от температуры для базового сплава Zn1Al0.5Ni и образцов, модифицированных скандием, графически представлен на рис. 3б.

Таблица 1. Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнение (3) для цинкового сплава ZnAl1Ni0.5, легированного скандием и эталона (Zn марки ХЧ)

Содержание скандия в сплаве, масс. %	a , K	$b \cdot 10^{-3}$, $с^{-1}$	p , K	$k \cdot 10^{-5}$, $с^{-1}$	$a \cdot b$, $Kс^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}$, $с^{-1}$
0.0	333.9128	6.08	317.3573	7.88	2.03	2.50
0.01	333.9127	6.08	316.3766	7,91	2.03	2.50
0.05	333.9092	6.08	316.2615	7.91	2.03	2.50
0.1	333.9082	6.08	315.9526	7.92	2,03	2.50
0.5	333.9073	6.08	315.6637	7.93	2.03	2.50
эталон	333.9112	6.08	316.8592	7.90	2.03	2.50



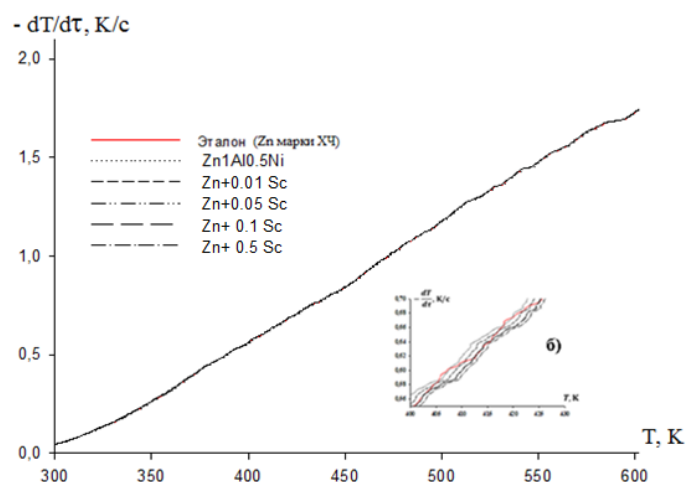


Рисунок 3. График зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорость охлаждения от температуры (б) для образцов из цинкового сплава ZnAl1Ni0.5, легированного скандием и эталона (Zn марки ХЧ).

На основании полученных расчётных значений мгновенных скоростей охлаждения образцов и эталона сравнения из высокочистого цинка по функциональному уравнению теплового баланса (1) была определена удельная изобарная теплоёмкость исследуемых металлических систем. Установлено, что температурная зависимость удельной теплоёмкости для всего исследованного концентрационного ряда сплавов с высокой степенью достоверности описывается обобщённым четырёхчленным полиномом вида:

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (4)$$

Численные значения эмпирических коэффициентов полинома (4), описывающего температурную зависимость удельной изобарной теплоёмкости базового цинкового сплава Zn1Al0.5Ni и образцов, легированных скандием, систематизированы в табл. 2.

Результаты расчёта температурной зависимости удельной изобарной теплоёмкости базового цинкового сплава Zn1Al0.5Ni и образцов, легированных скандием, выполненного на основании уравнений (1) и (4) с фиксированным температурным шагом $\Delta T = 100$, графически представлены на рис. 4а и систематизированы в табл. 3.

Таблица 2. Значения коэффициентов a , b , c , d в уравнении (4) для цинкового сплава ZnAl1Ni0.5, легированного скандием и эталона (Zn марки ХЧ)

Содержание скандия в сплаве, мас. %	a , $\frac{Дж}{(кг \cdot K)}$	b , $\frac{Дж}{(кг \cdot K^2)}$	$c \cdot 10^{-3}$, $\frac{Дж}{(кг \cdot K^3)}$	$d \cdot 10^{-6}$, $\frac{Дж}{(кг \cdot K^4)}$	Коэффициент корреляции (R^2)
0.0	391.4349	1.006	4.24	1.85	0.998
0.01	389,0804	1.145	4.39	1.92	0.998
0.05	389,0265	1.143	4.39	1.91	0.998
0.1	389,0260	1.140	4.39	1.91	0.998
0.5	389.3609	1.112	4.33	1.88	0.988
Эталон	389,0240	1.145	4.39	1.92	1.000

Таблица 3. Температурная зависимость удельной теплоёмкости (Дж/(кг·К)) цинкового сплава ZnAl1Ni0.5, легированного скандием и эталона (Zn марки ХЧ)

Содержание скандия в сплаве, масс. %	Т.К						
	300	350	400	450	500	550	600
0.0	394.4199	400.2331	407.1949	415.1668	424.0099	433.5855	443.7549
0.01	389.0564	394.5509	401.2324	408.9569	417.5804	426.9589	436.9484
0.05	389.0895	394.6098	401.3225	409.0841	417.7515	427.1813	437.2305
0.1	389.1790	394.7143	401.4420	409.2186	417.9010	427.3458	437.4100
0.5	389.8949	395.4229	402.1289	409.8719	418.5109	427.9049	437.9129
Эталон	389.0001	394.4945	401.1760	408.9005	417.5240	426.9025	436.8921

Из анализа полученных данных следует, что в исследованном интервале температур политермы теплоёмкости всех синтезированных сплавов характеризуются монотонно возрастающим характером. При этом увеличение концентрации скандия в структуре многокомпонентной системы приводит к закономерному снижению абсолютных значений удельной теплоёмкости исходного сплава $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$ во всем исследованном температурном диапазоне.

На основании полученных расчётных данных по теплоёмкости многокомпонентной системы $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$, легированной скандием, и экспериментальных политерм скоростей охлаждения образцов были верифицированы граничные условия внешнего теплообмена в калориметрической ячейке. Расчёт локальных значений коэффициента теплоотдачи $\alpha(T)$ ($Вт/(К \cdot м^2)$) для всего ряда исследованных составов осуществлялся по следующему функциональному уравнению:

$$\alpha = \frac{c_p^0 \cdot m \cdot \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S} \quad (5)$$

где T и T_0 – мгновенные температуры исследуемого образца и окружающей неподвижной воздушной среды соответственно;

m — фактическая масса образца;

S — полная площадь внешней геометрической поверхности цилиндрического образца.

Результаты расчёта температурной и концентрационной зависимостей коэффициента теплоотдачи сплавов системы $Zn_{1}Al_{0.5}Ni$, модифицированных скандием, представлены в таблице 4 и графически на рис. 4.

Таблица 4. Температурная зависимость изменений термодинамических функций цинкового сплава ZnAl1Ni0.5, легированного скандием и эталона (Zn марки ХЧ)

Содержание скандия в сплаве, масс. %	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов						
	Т, К						
	300	350	400	450	500	550	600
0.0	0,7295	20,5907	40,7719	61,3270	82,3032	103,7403	125,6716
0.01	0,7195	20,3045	40,1944	60,4451	81,1051	102,2157	123,8112
0.05	0,7197	20,3068	40,2006	60,4566	81,1240	102,2440	123,8524
0.1	0,7198	20,3118	40,2111	60,4735	81,1481	102,2763	123,8929
0.5	0,7211	20,3488	40,2830	60,5791	81,2852	102,4427	124,0859
Эталон	0,7194	20,3016	40,1887	60,4365	81,0937	102,2016	123,7942
$[S^0(T) - S^0(T_0)]$, кДж/(кг·К) для сплавов							
0.0	0,0024	0,0636	0,1175	0,1659	0,2101	0,2510	0,2891
0.01	0,0024	0,0626	0,1158	0,1635	0,2071	0,2473	0,2849
0.05	0,0025	0,0627	0,1159	0,1636	0,2071	0,2474	0,2850
0.1	0,0026	0,0628	0,1159	0,1636	0,2072	0,2474	0,2850
0.5	0,0027	0,0629	0,1161	0,1639	0,2075	0,2478	0,2855
Эталон	0,0028	0,0627	0,1158	0,1635	0,2070	0,2473	0,2848
$[G^0(T) - G^0(T_0)]$, кДж/кг для сплавов							
0.0	-0,0022	-1,6903	-6,2465	-13,3540	-22,7723	-34,3136	-47,8281
0.01	-0,0022	-1,6670	-6,1593	-13,1655	-22,4480	-33,8215	-47,1378
0.05	-0,0022	-1,6678	-6,16012	-13,1674	-22,4517	-33,8279	-47,1480
0.1	-0,0022	-1,6675	-6,1616	-13,1709	-22,4578	-33,8375	-47,1616
0.5	-0,0022	-1,6706	-6,1728	-13,1945	-22,4975	-33,8961	-47,2420
Эталон	-0,0022	-1,6667	-6,1584	-13,1637	-22,4448	-33,8166	-47,1312

$T_0 = 298.15\text{K}$.

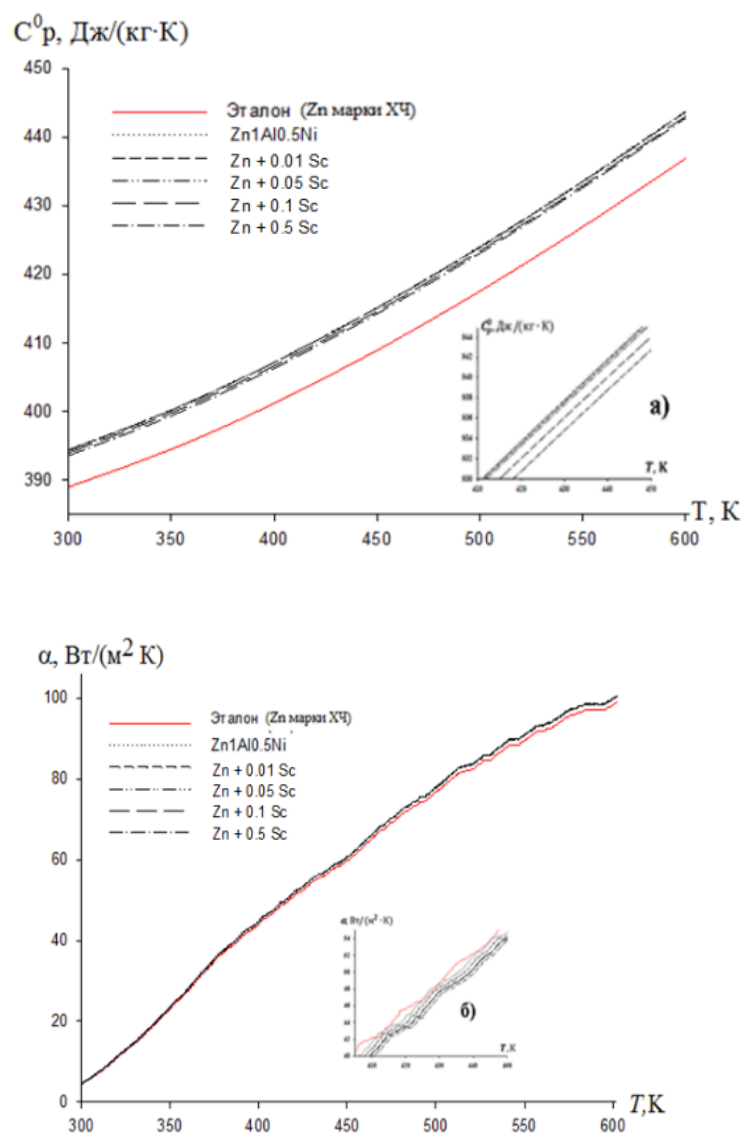


Рисунок 4. Температурная зависимость теплоёмкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) цинкового сплава ZnAl1Ni0.5, легированного скандием и эталона (Zn марки ХЧ)

Анализ полученных политерм показывает, что величина эффективного коэффициента теплоотдачи закономерно возрастает по мере интенсификации температурного воздействия (нагрева), в то время как увеличение содержания скандия в сплаве приводит к его монотонному снижению во всём исследованном температурном интервале. Для расчёта температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса цинкового сплава ZnAl1Ni0.5, легированного скандием по (6)-(8) были использованы интегралы от удельной

теплоёмкости по уравнению (4):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (6)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (7)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (8)$$

где $T_0 = 298.15\text{K}$.

С увеличением концентрации скандия в сплаве Zn1Al0.5Ni наблюдается контролируемое снижение абсолютных значений энтальпии и энтропии относительно исходной матрицы.

Выводы

Из анализа данных таблицы 4 следует, что с ростом абсолютной температуры значения энтальпии и энтропии всех исследованных металлических систем монотонно увеличиваются. При этом значения свободной энергии Гиббса закономерно смещаются в область более отрицательных величин, что термодинамически подтверждает фазовую стабильность и устойчивость сложнолегированной структуры к процессам термического старения в исследованном интервале температур.

Литература

1. Меньшикова С.Г., Каниболоцкий Д.С., Жиликов А.Ю. Термодинамические свойства расплавов системы Al-Zn-Ni // Физика и химия стекла. – 2018. – Т. 44. – № 3. – С. 278-285.
2. Дерябин А.А., Попель П.С. Исследование теплофизических свойств многокомпонентных сплавов на основе цинка и алюминия // Металлы. – 2017. – № 4. – С. 12-18.
3. Колесников С.В., Савченко А.М. Термодинамическое моделирование многокомпонентных систем на основе алюминия и цинка с редкоземельными металлами // Перспективные материалы. – 2022. – № 5. – С. 15-24.

4. Ткаченко С.С., Поздняков И.В. Теплопроводность и теплоёмкость сплавов системы цинк-алюминий в широком интервале температур // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – № 10. – С. 112-117.
5. Кашевский Б.Э., Береза Ю.Н. Калориметрическое исследование теплоемкости и теплот фазовых переходов в сплавах на основе цинка // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94. – № 4. – С. 912-920.
6. Белан С.В., Мацера А.С., Березуцкий В.В. Термодинамический анализ влияния легирующих элементов на структуру и свойства антикоррозионных покрытий // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – № 6. – С. 88-94.
7. Шейпак А.А., Поздняков А.В. Особенности фазовых превращений и теплофизических характеристик в сплавах системы Al-Zn-Mg-Ni // Цветные металлы. – 2021. – № 2. – С. 74-81.
8. Сидоров В.Е., Сон Л.Д., Рощупкин В.В. Теплофизические свойства жидких и твердых металлов и сплавов // Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54. – № 4. – С. 540-548.
9. Русанов А.И., Базаров И.П. Термодинамика поверхностных явлений и фазовая стабильность многокомпонентных металлических систем // Журнал физической химии. – 2019. – Т. 93. – № 11. – С. 1645-1652.
10. Логунов А.В., Разумовский И.М. Теоретические и экспериментальные методы исследования термодинамики жаропрочных сплавов // Материаловедение. – 2020. – № 8. – С. 3-10.
11. Gao J., Wang Y., Zhai Q., Chen R. Thermodynamic Modeling and Mechanical Properties of Mg-Zn-Y alloys // Crystals. 2021. V. 11. № 2. – P. 153.
12. Zhao D., Wang Q., Liu S., Sun J. The effects of yttrium element on microstructure and thermodynamic stability of Al-Zn-Mg alloys // Materials Science and Engineering: A. 2018. V. 721. – P. 315-323.
13. Kroupa A., Vízdal J., Osatová M., Zemanová A. Thermodynamic database for quaternary Zn-Al-Ag-Cu alloys // Calphad. 2015. V. 51. – P. 118-127.

14. Zhu S., Wang S., Cheng X. Effect of Yttrium on antioxidant process of Mg-Ni-Zn phase change heat storage alloys // International Journal of Energy Research. 2020. V. 44. № 8. – P. 6902-6911.
15. Hayer E., Komarek K. L. Thermodynamic properties and phase relations of Zn-rich alloys // International Journal of Materials Research. 2008. V. 99. № 10. P. 1098-1105.
16. Ганиев И.Н., Джумъева М.Б., Ходжаназаров Х.М., Одиназода Х.О., Худойбердизода С.У. Влияние цинка на теплофизические свойства и термодинамические функции свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) // Инженерно-физический журнал. – 2025. – Т. 98. – № 3. – С. 742-748.
17. Yamshchikov L. F., Lebedev V. A., Nichkov I. F. Thermodynamic properties of yttrium alloys with low-melting metals // Soviet Atomic Energy. 1980. V. 48. № 5. P. 329-331.
18. Akbaş S. Effect of yttrium addition on structural and thermodynamic properties of metallic alloys // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. V. 147. – P. 11245-11252.
19. Самошкин Д.А., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В., Агажанов А.Ш. Удельная теплоёмкость сплавов магния с кальцием в твёрдом состоянии // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – № 3. – С. 609-614.
20. Сайдахмадзода Р.С., Ганиев И.Н., Джайлоев Д.Х., Саидзода М.М., Киреев С.Ю., Худойбердизода С.У. Кинетика окисления алюминиевого сплава АМ4.5Мг1 типа дюралюмин с кальцием в твёрдом состоянии // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2026. – № 1 (108). – С. 79-94.
21. Тоирзода М.А., Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Саидзода М.М. Кинетика и механизм высокотемпературного окисления алюминиевого сплава системы Al-Mg-Li-Zr, легированного барием // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. – 2026. – Т. 1. – № 2 (55). – С. 37-47.

22. Тоирзода М.А., Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Саидзода М.М. Экспериментальное исследование удельной теплоёмкости и коэффициента теплоотдачи сплава $\text{AlMg5.5Li2.1Zr0.15}$ с барием // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. – 2026. – Т. 1. – № 2 (55). – С. 47-60.

**ВОБАСТАГИИ ҲАРОРАТИИ ГАРМИҒУНҶОИШ ВА ФУНКСИЯҲОИ
ТЕРМОДИНАМИКИИ ХҶЛАИ Zn1Al0.5Ni , КИ БО СКАНДИЙ ЛЕГИРОНИДА
ШУДААСТ**

Улфатов С.Э.¹, Ганиев И.Н.², Амонова А.В.², Саидзода М.М.³

Донишгоҳи давлатии Дангара¹

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ²

*«Академияи сайёҳӣ»-и Муассисаи давлатии «Донишгоҳи байналмилалӣ сайёҳӣ ва
соҳибкориҳои Тоҷикистон»³*

Аннотатсия. Хулаҳои бисёркомпонентии системаи Zn-Al-Ni синфи материалҳои ояндадори функционалиро конструкиониро ташикил медиҳанд, ки дар асбобсозии дақиқ, электротехника ва ҳангоми истеҳсоли рӯйпӯшҳои зиддикоррозиони баландсифат ворид мешаванд. Дар металлургияи муосири металҳои ранга таваҷҷуҳ ба хулаи заминавии Zn1Al0.5Ni бо ҷустуҷӯи роҳҳои баланд бардоштани устувории термодинамикӣ ва тобоварии ҳароратии он дар шароити боргузориҳои даврии гармӣ вобаста аст. Микролегирунии хулаҳо бо скандий, ки метали гузариш ва элементи нодир дорои наздикии баланд ба оксиген мебошад, барои модификатсияи ҳолати сохторию фазавӣ ва танзими мақсадноки хосиятҳои гармифизикии ин системаҳо имкониятҳои наффароҳам меорад. Дар кори мазкур бо усули динамикии претсизиони «хунукишавӣ» нисбат ба эталони реперии аз синки дараҷаи баланди тозагӣ омодашуда, бори аввал вобастагии ҳароратии гармиғунҷоии хоси изобарӣ муайян карда шуда, афзоиши функцияҳои термодинамикии интегралӣ (энталпия, энтропия ва энергияи озоди Гиббс)-и хулаи синки Zn1Al0.5Ni , ки бо скандий легирунида шудааст, ҳисоб карда шуд. Муайян гардид, ки дар фосилаи ҳароратҳои 300–600 К ворид намудани скандий (то 1.0 масс. %) боиси мунтазам паст шудани қиматҳои мутлақии гармиғунҷоии, энталпия ва энтропияи матритсаи аввалия мегардад. Дар заминаи таҳлили регрессиони гайрихаттӣ (коэффициенти детерминатсия $R^2 = 0.999$ полиномҳои эмпирикии ҳароратӣ ба даст оварда

шуданд, ки хосиятҳои термодинамикии ҳулаҳои таҳқиқшударо бо дараҷаи баланди эътимодноки тавсиф мекунанд.

Калидвожаҳо: ҳулаи синки $Zn1Al0.5Ni$, скандий, микросохтор, гармигунҷоии хоси изобарӣ, усули хунукиавӣ, синки тамғаи ХЧ, энталпия, энтропия, энергияи Гиббс, функсияҳои термодинамикӣ.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF HEAT CAPACITY AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF THE $Zn1Al0.5Ni$ ALLOY ALLIED WITH SCANDIUM

S.E. Ulfatov¹, I.N. Ganiev², A.V. Amonova², M.M. Saidzoda³

Dangara State University¹

Tajik Technical University after academician M.S. Osimi²

"Academy of Tourism" of the State Institution "International University of Tourism and Entrepreneurship of Tajikistan"³

Annotation. Multicomponent alloys of the Zn–Al–Ni system represent a class of promising functional and structural materials in high demand for precision instrument-making, electrical engineering, and the production of wear-resistant anti-corrosion coatings. In modern non-ferrous metallurgy, the interest in the base $Zn1Al0.5Ni$ alloy is driven by the search for ways to increase its thermodynamic stability and thermal resistance under cyclic thermal loads. Microalloying with scandium, a transition rare-earth element with a high affinity for oxygen, opens up new opportunities for modifying the structural-phase state and target-oriented regulation of the thermophysical properties of these systems. In this work, the temperature dependence of the specific isobaric heat capacity was determined for the first time by a precision dynamic "cooling" method relative to a reference standard made of high-purity zinc, and the increments of integral thermodynamic functions (enthalpy, entropy, and Gibbs free energy) of the $Zn1Al0.5Ni$ zinc alloy allied with scandium were calculated. It was established that in the temperature range of 300–600 K, the introduction of scandium (up to 1.0 wt. %) leads to a monotonic decrease in the absolute values of the heat capacity, enthalpy, and entropy of the initial matrix. Based on nonlinear regression analysis (coefficient of determination $R^2 = 0.999$, empirical temperature polynomials describing the thermodynamic characteristics of the investigated alloys with a high degree of confidence were obtained.

Keywords: zinc alloy $Zn1Al0.5Ni$, scandium, microstructure, specific isobaric heat capacity, cooling method, zinc grade Ts00, enthalpy, entropy, Gibbs energy, thermodynamic functions.

Сведения об авторах: Улфатов Сухробджон Эмомалиевич – преподаватель кафедры «Инженерия и энергетика» Дангаринского государственного университета. Адрес: 735320, Республика Таджикистан, Хатлонская обл., Дангаринский р-н, Маркази 25, 1. E-mail: ulfatov.96@mail.ru.

Ганиев Изатулло Наврузович – академик, д.х.н., профессор Таджикского технического университета имени академика М. Осими. Адрес: 734025. Таджикистан, г. Душанбе, ул. академиков Раджабовых, 10. Тел.: (+992 93) 572 88 99. E-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Амонова Азиза Валиевна – к.х.н., старший преподаватель кафедры технологии химических производств Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Адрес: 734025. Таджикистан, г. Душанбе, ул. академиков Раджабовых, 10. E-mail: amonovaaziza@mail.ru.

Саидзода Масрур Мирзохон – д.т.н., профессор, ректор Академии туризма Государственного учреждения «Международный университет туризма и предпринимательства Таджикистана». Адрес: 734055, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Борбад, 48/5. Тел.: (+992 93) 127 06 07. E-mail: masrur.saidzoda.88@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллифон: Улфатов Сухробҷон Эмомалиевич – омӯзгори кафедраи муҳандисӣ ва энергетикаи Донишгоҳи давлатии Данғара. Суроға: 735320, Ҷумҳурии Тоҷикистон, вил. Хатлон, ноҳ. Данғара, Марказӣ 25, 1. E-mail: ulfatov.96@mail.ru.

Ғаниев Изатулло Наврӯзович – академик, д.и.х., профессори Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М. Осимӣ. Суроға: 734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, Душанбе, хиёб. академикҳо Раджабовҳо, 10. Тел.: (+992 93) 572 88 99. E-mail: ganievizatullo48@gmail.com.

Амонова Азиза Валиевна – н.и.х., муаллими калони кафедраи технологияи истеҳсолоти химияи Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. Суроға: 734025. Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёб. академикҳо Раджабовҳо 10. E-mail: amonovaaziza@mail.ru.

Саидзода Масрур Мирзохон – д.и.т., профессор, ректори «Академияи сайёҳӣ»-и Муассисаи давлатии «Донишгоҳи байналмилалӣ сайёҳӣ ва соҳибкорӣ Тоҷикистон». Суроға: 734055. Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёб. Борбад 48/5. Тел.: (+992 93) 93 127 06 07. E-mail: masrur.saidzoda.88@mail.ru.

Information about the Authors: Sukhrobjon Emomaliyevich Ulfatov – Lecturer of the Department of "Engineering and Power Engineering", Dangara State University. Address: Markazi 25, 1, Dangara dist., Khatlon reg., Tajikistan, 735320. E-mail: ulfatov.96@mail.ru.

Izatullo Navruzovich Ganiev – Academician, DSc in Chem., Professor of the Tajik Technical University after academician M.S. Osimi. **Phone:** (+992 93) 572 88 99. **E-mail:** ganievizatullo48@gmail.com.

Aziza Valiyevna Amonova – PhD in Chemical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Chemical Production Technology of the Tajik Technical University after academician M.S. Osimi. **Address:** Academician Radjabov Str., 10, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **E-mail:** amonovaaziza@mail.ru.

Saidzoda Masrour Mirzokhon – DSc in Tech., Professor, Rector of the Academy of Tourism of the State Institution "International University of Tourism and Entrepreneurship of Tajikistan". **Address:** Borbad Ave., 48/5, Dushanbe, Tajikistan, 734055. **Phone:** (+992 93) 127 06 07. **E-mail:** masrur.saidzoda.88@mail.ru.

УДК 55.504

**ЭРОЗИОННЫЕ ФЛЮВИАЛЬНЫЕ МИКРО-И МЕЗОФОРМЫ В
СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ ЮЖНОГО ГИССАРА****Салихов Ф.С., Саидов М.С., Махдизода М.М.*****Филиал Московского государственного университета имени******М.В. Ломоносова в городе Душанбе***

Аннотация. В статье рассматривается малоизученный аспект флювиального процесса, а именно образование эрозионных борозд в скальных породах – метаморфизованных известняках каменноугольного возраста Южного Гиссара. Обоснованы термический, химический, климатический и пространственный факторы генезиса этих геоморфологических объектов. Приводится морфологическое описание и определение особенностей генезиса этого типа эрозионных борозд. Также они рассматриваются в качестве примера объектов геонаследия или геотуризма, а также как индикатор изменения климата.

Ключевые слова: эрозия, борозда, известняк, растворимость, снег, температура, экспозиция склона, геологический памятник природы, Майхура, Южный Гиссар, Таджикистан.

Эрозионные процессы в дисперсных породах изучены достаточно полно, в том числе аналитическими и лабораторными методами [1]. Эти породы или грунты, в абсолютном большинстве случаев являются основанием различных зданий и сооружений и закономерно, что геологические процессы, которые могут оказывать влияние на конструктивную схему зданий и сооружений, на выбор места расположения и методы строительства, относятся к инженерно-геологическим процессам. Эрозионные борозды повсеместно развиты в рыхлых грунтах, где они образуются при переходе от плоскостного смыва к линейному [1]. Эрозия скальных пород всё ещё остается во многом малоизученной областью, хотя эстетическая привлекательность выветрелых скальных пород, образующих причудливые формы, весьма высока, что позволяет отнести их к

объектам геонаследия или геотуризма [2]. Примеров тому - множество объектов в различных странах, в том числе и в Таджикистане (каменные грибы, арки, гроты, крупные массивы причудливых форм, таких как Чильдухтарон или Ширкентский барьер и др.) [3, 4]. Одними из интересных геоморфологических объектов являются эрозионные борозды в нижнекарбонových визейских известняках в скальном массиве над северным порталом тоннеля «Дружба» автодороги Душанбе-Чанак, в 70 км к северу от г. Душанбе, на слиянии рек Майхура и Зидди, на правом борту долины (рис. 1). Борозды шириной до 36 см, глубиной до 16 см, длиной до 10-15м в абсолютном большинстве параллельны друг другу, слагают отдельные участки размером до нескольких десятков квадратных метров бронированного склона скального массива - селективные участки, наиболее удобные и податливые для эрозии (рис. 2). Расстояние между бороздами практически везде одинаковы и составляют 5-15 см, реже это расстояние незначительно уменьшается или увеличивается.



Рисунок 1. Скальный массив нижнекарбонových известняков.

Слияние рек Майхура и Зидди, правый борт долины (общий вид)

Отличительной особенностью описываемых борозд является их «неклассический» карровый облик. Как приводится в Большой Советской энциклопедии и в Геологическом словаре, «Кáрры (от нем. Karren) борозды (глубиной от нескольких сантиметров до 1-2 м и более), характерны для областей развития голого карста.

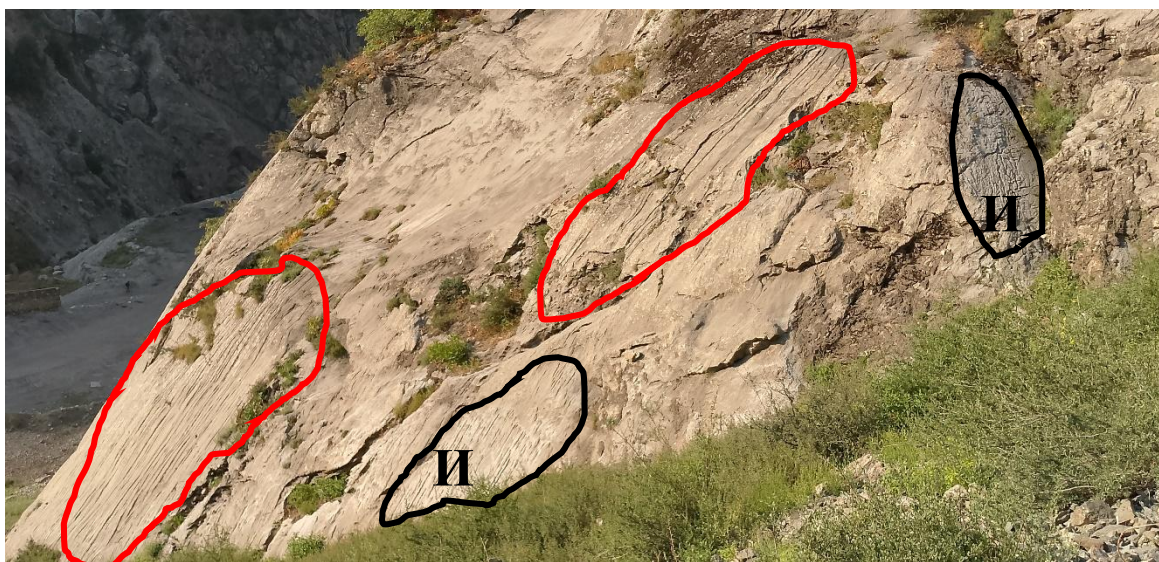


Рисунок 2. Участки распространения борозд (селективные участки).
И – инверсионные борозды

Расположены параллельными рядами или ветвистыми лабиринтами, обычно разделены узкими, острыми гребнями. Возникают в результате выщелачивания дождевой, талой снеговой, реже морской и речной водой поверхности известняков и др. растворимых горных пород. Часто развиваются по трещинам (трещинные К. и др.). На крутых скалистых поверхностях К. не связаны с трещинами (желобковые К., стенные К.) [5]». Однако в данном случае отмечается ряд особенностей, характерных для этих борозд, в частности отсутствие остроконечных перемычек между бороздами. Установление количественных показателей, характеризующих процессы, приводящие к образованию подобных эрозионных борозд, факторы формообразования позволяют выявить причины возникновения и развития этих процессов, что является сложной и методологически неразработанной проблемой [6]. Одной из главных причин столь необычных форм майхуринских эрозионных борозд, на наш взгляд является весьма ограниченный по показателям климатический контроль. Разумеется, формообразующую роль играет и пространственный контроль (элементы залегания пород, экспозиция скальных склонов) [6].

Пространственный контроль. Борозды образуются исключительно на обнаженной и ненарушенной поверхности слоя, бронирующей склон. Крутизна

склона совпадает с углом падения слоя и должна быть в пределах 60-75°. При других значениях угла падения борозды не образуются.

Абсолютное большинство борозд одиночны и параллельны друг к другу, очень редко пересекаются. Иногда образуются расходящиеся (рис. 3А) и сходящиеся (рис.3Б) древовидные разновидности, состоящие из 3-8 борозд. Причиной таких форм являются естественные геоморфологические барьеры – уступы, трещины, первичные неровности бывшего дна бассейна (рис. 2).

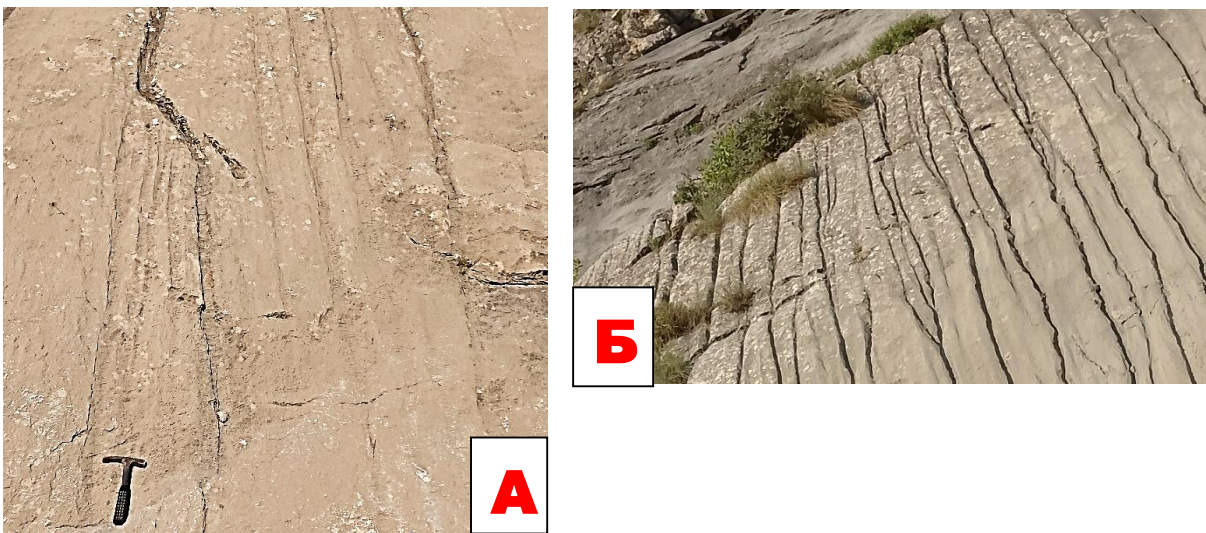


Рисунок 3. Расходящиеся (А) и сходящиеся (Б) борозды

Продольный профиль борозд. В большинстве случаев глубина борозды одинакова по всей длине борозды. Практически все борозды выполаживаются к нижнему краю.

Поперечный профиль борозд. Отмечаются три типа борозд: V-образная, ящиковидная, сундучная (рис. 4). Наблюдается неявная зависимость глубины борозд от формы, наименьшая для I типа, наибольшая для III типа. Собственно, самые крупные борозды можно назвать промоинами.

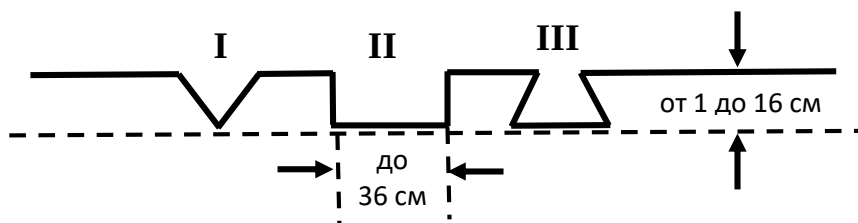


Рисунок 4. Форма и размеры борозд в поперечном сечении. I - V-образная, II - ящиковидная, III – сундучная

Инверсионные эрозионные борозды. Представляют собой отрицательный эрозионный рельеф, являющийся негативными останцами поверхности слоя в виде выступающих борозд на почти полностью размытой первичной поверхности. Образуются на более крутых склонах (до 80-85°) и более теневой (северо-восточной) экспозиции (рис. 5).



Рисунок 5. Инверсионные эрозионные борозды

Экспозиция склона. Обнажение представляет собой слегка выпуклый склон с вариациями экспозиции участков развития разновидностей эрозионных борозд, что обуславливает различие двух типов борозд – нормальных и инверсионных на разных по экспозиции участках. Проведенные замеры показывают для первого типа – азимут простираня – 140-150°, угол 60-75°, для второго типа – азимут простираня – 110-120°, угол 60-75°.

Особенности генезиса. Морфология, географические (климат, температура, влажность) и литологические особенности вмещающих известняков майхуринских эрозионных борозд позволяют уточнить некоторые генетические особенности. Нижнекарбоновые визейские известняки рассматриваемой территории представляют собой серые, темносерые, тонкозернистые, пелитоморфные, однороднозернистые, метаморфизованные, местами сгустково-комковатые, иногда перекристаллизованные до мелкозернистых разностей хемогенные известняки. Порода весьма однородная и массивная, образует неявно выраженные слои мощностью от десятков см (редко) до нескольких и даже первых десятков м. Такая однородность и мономинеральность цемента и обломков вмещающей породы ограничивает разнообразие форм борозд. Исследуемый район относится к одному из наиболее влажных территорий Таджикистана с годовым количеством осадков около 2500 мм/год, с жарким летом, мощным снеговым покровом зимой и дождливыми весной и осенью. Такая контрастная климатическая сезонность обуславливает интенсивное развитие корразионных процессов, приводящих к описанным характерным формам эрозионных борозд. При этом интенсивное образование борозд ограничено краткими периодами поздней зимы/ранней весны и ранней осени, где наблюдается резкий перепад дневных и ночных температур. Большую роль играет и дневной температурный цикл, а именно первая половина дня – время интенсивного таяния снега и льда, перехода от теплового расширения (замерзания) к таянию (сжатию) воды и дальнейшему механическому воздействию ветра, воды, льда, истиранию в гравитационном или водном потоке.

Снег и лёд играют значительную роль в образовании эрозионных борозд, являясь первоначальным фактором формообразования. Количество поверхностно текущей воды также играет свою роль в развитии борозд, ее не должно быть много до количеств сплошного покрытия поверхности слоя. Именно медленное таяние замерзшей за ночь воды в первой половине дня дает равномерное многоструйное стекание и соответственно нагрев воды/растворение породы. Нами подручными средствами было смоделировано

идеализированное распределение водяного потока при переходе из дисперсной среды на вертикальную монолитную поверхность (рис. 6).



Рисунок 6. Идеализированная модель распределения водяного потока при переходе из дисперсной среды на вертикальную монолитную поверхность (Зиддинский геологический полигон филиала МГУ)

Этот временной период медленного таяния благоприятен для повышения содержания в воде растворенного CO_2 , основного условия образования неустойчивой двухосновной неорганической угольной кислоты H_2CO_3 , агрессивно воздействующей на карбонатную породу ($\text{pH} \sim 5,6$). Объясняется это тем, что кальцит CaCO_3 довольно трудно растворимый в воде, образует с углекислотой легкорастворимый бикарбонат $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Помимо диоксида углерода растворяющее действие на известняки могут оказывать и другие кислоты, например, гуминовая. Известно, что гуминовые вещества – сложный комплекс высокомолекулярных природных органических соединений, образующихся при разложении растительного лигнина в почвах, обладают повышенной способностью растворять окружающие породы. Рассматриваемый район отличается обильностью однолетнего и многолетнего растительного покрова.

Выводы

Таким образом, основными условиями, определившими образование и развитие эрозионных борозд долины р. Майхура, являются:

- общий рельеф скального массива – слегка выпуклый субвертикальный склон, где борозды образуются исключительно на обнаженной и ненарушенной поверхности слоя, бронирующей склон. Крутизна склона совпадает с углом падения слоя и должна быть в пределах 60-75°. При других значениях угла падения борозды не образуются;
- литологические особенности метаморфизованных известняков каменноугольного возраста (однородность и мономинеральность цемента и обломков вмещающей породы) ограничивают разнообразие форм борозд;
- основным формообразующим фактором является климатический контроль: рассматриваемый район является одним из наиболее влажных территорий Таджикистана (количество осадков около 2500 мм/год). Контрастная климатическая сезонность обуславливает интенсивное развитие корразионных процессов;
- интенсивное образование борозд связано с резкими перепадами дневных и ночных температур характерных для кратких периодов поздней зимы/ранней весны и ранней осени;
- большую роль играет дневной температурный цикл, а именно первая половина дня – время интенсивного таяния снега и льда, перехода от теплового расширения (замерзания) к таянию (сжатию) воды, то есть амплитуда и особенно скорость изменения температуры. Поэтому суточные колебания играют большую роль, чем сезонные;
- количество поверхностно текущей воды также играет свою роль в развитии борозд. Именно медленное таяние замерзшей за ночь воды в первой половине дня даёт равномерное многоструйное стекание и соответственно нагрев воды/растворение породы, что косвенно подтверждается моделью

идеализированного распределения водяного потока при переходе из дисперсной среды на вертикальную монолитную поверхность;

- Майхуринские эрозионные борозды как редкое геоморфологическое образование являются полноценным геологическим памятником природы и объектом геотуризма.

Литература

1. Сидорчук А.Ю. Динамическая модель овражной эрозии// Геоморфология. – 1998. – № 4. – С. 28-37.
2. Салихов Ф.С., Нигматова С.А., Товмасын К. Геологические памятники природы Фан-Ягноба как перспективный геопарк Таджикистана// Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук, г. Душанбе. – 2022. – Т. 1. – № 4. – С. 81-93.
3. Новиков В.П., Салихов Ф.С., Супрычев В.В. Геологические памятники природы – объекты экологического просвещения и туризма в Таджикистане. //Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук. – 2022. – Т.1. № 3. – С. 94-103.
4. Салихов Ф.С., Шодии Бек. Моренный ландшафт Восточного Памира - разновидность ландшафтного туризма// Наука и инновация. Серия геологических и технических наук, г. Душанбе. Изд.: ТНУ. – 2023. – Т. 2. – № 1. – С. 114-121.
5. Большая Советская энциклопедия.
Источник: <https://gufo.me/dict/bse/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%80%D1%8B>
6. Макарова Н.В., Суханова Т.В. Геоморфология// Уч. пособие. 2-е изд. М.: КДУ, 2009. – 414 с.

EROSIONAL FLUVIAL MICRO- AND MESOFORMS IN ROCKS OF SOUTHERN HISSAR

Salikhov F.S., Saidov M.S., Mahdizoda M.M.

Lomonosov Moscow State University in Dushanbe

Annotation. This article examines a rare aspect of the fluvial process: the formation of erosional grooves in rock formations—metamorphosed Carboniferous limestones of Southern Hissar. The thermal, chemical, climatic, and spatial factors underlying the genesis of these geomorphological features are substantiated. The first morphological description and definition of the genesis features of this type of erosional groove are presented. They are also considered as examples of geoheritage or geotourism sites.

Keywords: erosion, groove, limestone, solubility, snow, temperature, slope aspect, geological natural monument, Maikhura, Southern Hissar, Tajikistan.

МИКРО- ВА МЕЗОФОРМҲОИ ЭРОЗИЯИ ФЛЮВИАЛӢ ДАР ЧИНСҲОИ КӢҲИИ ҲИСОРИ ЧАНУБӢ

Салихов Ф.С., Саидов М.С., Магдиев М.М.

Филиали Донишгоҳи давлатии Масква ба номи М.В. Ломоносов дар ш. Душанбе

Аннотатсия. Дар мақола як ҷанбаи нодири раванди ҷараён пайдоиши чуқуриҳои эрозионии ҷӯякшакл дар оҳаксангҳои метаморфишудаи карбонии Ҳисори Ҷанубӣ баррасӣ мешавад. Омилҳои ҳароратӣ, химиявӣ, иқлимӣ ва фазоӣ, ки хусусиятҳои генетикии геоморфологӣ мебошанд, асоснок карда шудаанд. Аввалин тавсифи морфологӣ ва муайян кардани хусусиятҳои генетикии ин навъи чуқуриҳои эрозионии ҷӯякшакл оварда шудааст. Онҳо инчунин ҳамчун намунаҳои ёдгории табиӣ геологӣ ва объекти геотуризм ҳисобида мешаванд.

Калидвожаҳо: эрозия, чуқурии ҷӯякшакл, оҳаксанг, ҳалишавандагӣ, барф, ҳарорат, нишебӣ, ёдгории табиӣ геологӣ, Майхура, Ҳисори Ҷанубӣ, Тоҷикистон.

Сведения об авторе: Салихов Фарид Салохиддинович – д.г.-м.н., и.о. профессора кафедры Науки о Земле Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. **Адрес:** 734003, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Бохтар, 35/1. **Тел.:** (+992 90) 400 09 99. **E-mail:** ffaarriidd@bk.ru.

Саидов Мирзо Сибгатуллоевич – д.г.-м.н., профессор кафедры Науки о Земле филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. **Адрес:** 734003, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Бохтар, 35/1. **Тел.:** (992 93) 868 97 10. **E-mail:** saidov-mirzo@mail.ru.

Махдизода Мухаммадамин Махмуд – ассистент кафедры математики и естественных наук филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. **Адрес:** 734003, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Бохтар 35/1. **Тел.:** (+992 91) 864 00 60. **E-mail:** magdiyev.mukhammadamin@bk.ru.

Маълумот дар бораи муаллифон: **Солихов Фарид Салоҳиддинович** – д.и.г.-м., и.в. профессораи кафедраи Илмҳо оид ба Замини филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе. **Суроға:** 734003, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Бохтар, 35/1. **Тел.:** (+992 90) 400 09 99. **E-mail:** ffaarriidd@bk.ru.

Саидов Мирзо Сибгатуллоевич – д.и.г.-м., профессораи кафедраи Илмҳо оид ба Замини филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе. **Суроға:** 734003, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Бохтар, 35/1. **Тел.:** (+992 93) 868 97 10. **E-mail:** saidov_mirzo@mail.ru.

Махдизода Мухаммадамин Махмуд – ассистенти кафедраи Илмҳо оид ба Замини филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе. **Суроға:** 734003, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Бохтар 35/1. **Тел.:** (+992 91) 864 00 60. **E-mail:** magdiyev.mukhammadamin@bk.ru.

Information about the authors: **Salikhov Farid Salokhiddinovich** – DSc in Geol. & Min., Acting Professor of the Department of Earth Sciences, Lomonosov Moscow State University in Dushanbe. **Address:** Bokhtar Str. 35/1, Dushanbe, Tajikistan, 734003. **Phone:** (+992 90) 400 09 99. **E-mail:** ffaarriidd@bk.ru.

Saidov Mirzo Sibgatulloevich – DSc in Geol. & Min., Professor of the Department of Earth Sciences of Lomonosov Moscow State University in Dushanbe. **Address:** Bokhtar Str. 35/1, Dushanbe, 734003, Tajikistan. **Phone:** (992 93) 868 97 10. **E-mail:** saidov_mirzo@mail.ru.

Mahdizoda Muhammadamin Mahmud – assistant of the Department of Earth Sciences, Lomonosov Moscow State University in Dushanbe. **Address:** Bokhtar Str. 35/1, Dushanbe, Tajikistan, 734003. **Phone:** (+992 91) 864 00 60. **E-mail:** magdiyev.mukhammadamin@bk.ru.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРАКТИКИ РАННИХ КУРСОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ СТАНОВЛЕНИЕ ГЕОЛОГОВ

Спиридонов А.В.¹, Салихов Ф.С.²

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова¹

Филиал Московского государственного университета имени

М.В. Ломоносова в городе Душанбе²

Аннотация. Учебно-полевые практики студентов 1 и 2 курсов – полевое освоение навыков и методов работы являются важнейшим этапом учебной программы, фундаментом всех последующих специальных дисциплин. Для их проведения требуется соответствующая инфраструктура. Две основные базы проведения практик – Крымская учебно-научная база МГУ в Бахчисарайском района Крыма и Зиддинский геологический полигон Зидди в Варзобском районе Таджикистана обладают уникальными возможностями для проведения практик: непрерывный широкий стратиграфический интервал отложений, широчайший набор литологических разновидностей осадочных пород, разнообразные магматические и метаморфические породы, минералы различного генезиса, складчатые и разрывные тектонические структуры, формы рельефа, карст, работу моря, рек, ледников, современные отложения – аллювиальные, гляциальные, склоновые, антропогенные геологические факторы, минеральные и пресные источники а также риски и последствия стихийных бедствий. Требуется всемерно развивать базы геологических практик. Во время межсезоний, между практиками должна быть возможность организовывать на этих базах туристические маршруты, конференции и др. мероприятия.

Ключевые слова: учебно-полевые практики, базы практик, геологические процессы, памятники природы, Бахчисарай, Крым, Зидди, Таджикистан.

Одним из важнейших этапов становления специалиста-геолога (да и любого другого специалиста) является практика – полевое освоение навыков и методов работы. Это практически невозможно без создания соответствующей инфраструктуры: от мест проживания и питания до создания условий для камеральной обработки данных. Для этого и нужны базы практик.

Крымская учебно-научная база МГУ расположена в Бахчисарайском районе Республики Крым, в с. Прохладное, в 3 км от Крымской астрофизической обсерватории. Такое положение не случайно: на расстоянии не более 15 км от Базы можно описать выходы почти всех встречающихся в Крыму пород – с триаса по конец палеогена. Так же в районе Базы МГУ и Бахчисарая можно наблюдать проявления различных геологических процессов и разных форм рельефа. Именно это и служит главной причиной проведения практик по курсам «Общая геология» (1 курс) и «Структурная геология и геологическое картирование» (2 курс) с опорой на Крымскую учебно-научную базу [1].

Необходимо отметить, что за время своего существования Крымский полигон (так называют Базу студенты – из-за формы планшета рисуемой карты) претерпел значительные изменения. От голого, разве что – террасированного, склона горы Сельбухра с рядами брезентовых палаток до каменных домиков в тенистых аллеях, с футбольной и волейбольной площадками. Значительная часть работ по благоустройству, озеленению, развитию Базы была сделана силами самих студентов. Весомый вклад в развитие Базы внесли В.С. Милеев, Н.Н. Курдин, А.И. Тюрин, С.Н. Болотов, бывшие в разное время начальниками Крымской практики или начальниками курса, проходящего практику.

Если вспомнить слова Аристотеля: «Познание начинается с удивления» – становится очевидной и точка зрения профессора А.Г. Рябухина «Первокурсникам должен преподавать профессор! Именно тогда закладываются самые важные базовые знания и навыки!». Мало кто из аспирантов или молодых ученых может так увлечь темой исследований, как уже опытный, сложившийся профессионал. С другой стороны – исключения тоже бывают, и они лишь подтверждают это правило. Некоторые прекрасные ученые не могут донести свою мысль до слушателей, пока не обладающих обширными ранее приобретенными знаниями. Изредка аспиранты уже проявляют такой кругозор и энтузиазм, что студенты увлекаются их идеями. А это выливается в одно из важнейших качеств, воспитываемых высшим образованием: преданность Науке и Пути исследователя.

Геологические практики – именно тот формат, который в МГУ проходит не просто на высшем мировом уровне, но – по мнению многих коллег из-за рубежа – даже лучше, чем в зарубежных университетах. Именно это – точка роста и потенциал для дальнейшего развития и повышения научного, культурного уровня и кругозора студентов. Суровые полевые условия только закаляют характер и проявляют как лучшие, так и худшие его черты. Именно на практиках достигается наилучшее взаимопонимание между преподавателем и студентом, как между старшим товарищем и младшим коллегой. Авторы статьи до сих пор с благодарностью вспоминают своих Учителей, которые окончательно стали таковыми именно благодаря полевым практикам, с их не формализованным бытом – переходами, усталостью, привалами и байками у костра. Это важнейшая часть культурного кода профессии, передающаяся полевым путём!

Многие объекты, изучаемые на практике, являются или становятся впоследствии Памятниками природы [2], а их необходимо внимательно изучить и поддерживать. К сожалению, часто приходится видеть, что Памятники природы разрушаются, объекты застраиваются или приходят в негодность. В таком случае они остаются в виде документации, описаний, в том числе – студентами на практиках. Хорошим примером здесь может служить книга М.В. Муратова о Крыме [3]. Путеводитель, предложенный во втором томе, был составлен на основе рассмотрения объектов, изучаемых в ходе геологических практик. Часть объектов, рекомендованных им к посещению уже, увы, утрачена безвозвратно.

База полевой геологической практики Филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе – полигон Зидди. Геологические экскурсии студентов-геологов филиала МГУ в городе Душанбе распланированы таким образом, чтобы именно на примере геологических памятников дать точные и глубокие профессиональные знания начиная с первых дней учебы.

В образовательных программах высших учебных заведений по естественнонаучным дисциплинам немалое место отводится учебным, учебно-полевым практикам, где возможно наиболее тесное знакомство с такими

объектами. Хотя объективно, для изучения фундаментальных геологических понятий, процессов и объектов нет не только необходимости, но и целесообразно изучать наиболее простые, характерные, «модельные» явления, тем не менее выдающиеся, редкие или уникальные геологические памятники дают неоценимую пользу, своего рода толчок для дальнейшего профессионального интереса и мотивации студентов. Формирование практических геологических навыков студентов происходит в отведенное на практику учебное время, поэтому целесообразно максимально полно использовать это время для полевых изучений геологических памятников. Очевидно, что если практики проводятся на стационарных полигонах, полевых учебных базах, то местоположение геологических памятников природы должно быть в маршрутной доступности. Студенты 1 и 2 курсов геологического направления Филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе проводят летние практики (общегеологическую и геокартировочную, соответственно) на геологическом полигоне Зидди в 70 км к северу от столицы. Полигон расположен в Зиддинской впадине, уникальном геологическом объекте по разнообразию представленных здесь геологических процессов и объектов [4]. Он используется уже в течении почти 70 лет. В пределах маршрутной доступности студенты изучают непрерывный стратиграфический интервал (исключая пермский период) от ордовика до современных четвертичных отложений, широчайший набор литологических разновидностей осадочных пород, разнообразные магматические и метаморфические породы, минералы различного генезиса, складчатые и разрывные тектонические структуры, формы рельефа, карст, работу рек, ледников, современные отложения – аллювиальные, гляциальные, склоновые, антропогенные геологические факторы, минеральные и пресные источники а также риски и последствия стихийных бедствий. Разумеется, в этом длинном списке должны присутствовать и геологические памятники природы. Причем не просто обычные геологические объекты – обнажения, разрезы, источники, оползни, пещеры, водопады и т.п., а с редкими или неповторимыми признаками и особенностями, позволяющими отнести их к геологическим памятникам

природы [5]. Такими в пределах геологического полигона Филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе в долине р. Зидди являются (фото 1-3):

- урочище Санги Навишта – обнажения и эродированные обломки уникальных по параллельно-слоистым, складчатым текстурам метаморфизованных известняков карбон-пермского возраста (фото 1);
- местонахождение зубов палеогеновых акул – разрез сузакских глин на левом борту р. Оби Шур (фото 2);
- неогеновая сундучная складка на правом борту р. Зидди (фото 3);
- минеральный источник Ходжа Сангхок в верховьях р. Зидди;
- следы катастрофического оползня Комодон, перекрывшего русло реки Зидди в 1978 г. на правом борту долины р. Зидди.

Таким образом мы привели лишь краткий перечень геологических памятников, выбрав наиболее значимые, хотя в целом, объектов, подпадающих под определение «геологический памятник природы» на рассматриваемой территории гораздо больше.



Фото 1. Метаморфизованные известняки карбон-пермского возраста из урочища Санги Навишта (фото Салихова Ф.С.)



Фото 2. Местонахождение зубов палеогеновых акул – разрез сузакских глин на левом борту р. Оби Шур и находки (фото Салихова Ф.С.)



Фото 3. Неогеновая сундучная складка на правом борту р. Зидди (фото Салихова Ф.С.)

Необходимо отметить также, что базы геологических практик должны быть оборудованы для геологических практик: иметь камеральные помещения, а желательно – и музейный корпус с образцами флоры и фауны, дающими возможность самостоятельной работы студентов с датируемым каменным материалом. Без возможности полноценных камеральных работ даже самая хорошая в бытовом плане база – всего лишь дом отдыха. Об этом, например, свидетельствует опыт практики по «Общей геологии» и «Структурной геологии и тектонофизике» в 2014 году в районе г. Туапсе. Одному из авторов довелось их проводить. База практики была очень удобной с точки зрения быта – пансионат «Буревестник» на берегу Чёрного моря, но абсолютно не приспособленный для работы. Камеральные работы приходилось проводить в беседках, хранить образцы горных пород в жилых комнатах, обрабатывать результаты почти без применения современных компьютерных методов вследствие отсутствия электричества в непригодных камеральных помещениях. Закономерно, что результат получился весьма слабым и нежизнеспособным.

Выводы

Необходимо всемерно развивать базы геологических практик. Во время межсезоний, между практиками должна быть возможность организовывать на этих базах туристические маршруты, конференции и др. мероприятия. Хорошим примером могут служить посещения объектов студенческих практик во время конференций в Севастополе или посещение долины Фан-Ягноб во время недавней конференции по ледникам в Душанбе. Предлагается широкое использование геологических памятников долины р. Зидди в качестве элементов образовательных программ, при том, что по самым предварительным оценкам количество такого рода объектов велико и природного вреда им не предвидится. Знакомство и изучение в течении полевых практик геологических памятников природы в долине р. Зидди существенно повышает качество знаний по геологическим дисциплинам. Изучение геологических памятников в образовательном процессе имеет широкий как образовательный, так и

воспитательный потенциал. Так же необходимо наладить обмен студентами и преподавателями, проводящими полевые практики, возможно – на уровне курсов повышения квалификации для последних. Так, например, авторы статьи во время упоминавшийся экскурсии в Фан-Ягноб успели многому друг у друга научиться, это был весьма познавательный опыт.

Литература

1. Милановский Е.Е. «Предыстория» и начальные этапы истории учебной геологической практики МГУ в Бахчисарайском районе Горного Крыма// Вестник Московского университета. – Серия 4. Геология. – 1997. – № 3. – С. 3-6.
2. Гусев, А.В., Спиридонов, А.В., Николаева, Т.А., Арешин, А.В. Геологические памятники природы. Критерии их выделения и современная классификация. // Ресурсно-экологические проблемы волжского бассейна: доклады Международной научно-практической конференции; Владимир 20-22 октября 2011г (2011), ВлГУ Владимир. – С. 55-62.
3. Муратов М.В. Руководство по учебной геологической практике в Крыму // Геология Крымского полуострова. Москва, Недра. 1973. – Т. 2. – 192 с.
4. Саидов М.С., Давлатов Ф.С., Салихов Ф.С., Саидов С.М., Гайратов М.Т. Геологическая практика в Зиддинской долине// Изд.: СИНО, Типография ТНУ, г. Душанбе, 2020. – 120 с.
5. Баратов Р.Б., Новиков В.П. Каменное чудо Таджикистана// – 2-е изд. переработ. и доп. – Душанбе: Ифрон, 1988. – 164 с.
6. Салихов Ф.С. Геологические памятники природы в образовательных программах филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе// Материалы международной научно-практической конференции «Миллионы лет до Шёлкового пути», Алматы, Казахстан, 2022. – С. 82-91.

ТАҶРИБАОМУЗИИ ГЕОЛОГИИ КУРСҶОИ АВВАЛ ВА ТАЪСИРИ ОНҶО БА ИНКИШОФИ КАСБИИ ГЕОЛОГҶО

Спиридонов А.В.¹, Салихов Ф.С.²

Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов¹

Филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе²

Аннотатсия. Таҷрибаомузии саҳроии донишҷӯёни курсҳои 1 ва 2 - ташаккули маҳорат ва усулҳои кор дар саҳро - муҳимтарин марҳилаи барномаи таълимӣ, таҳкурсии тамоми фанҳои махсуси минбаъда мебошад. Онҳо барои иҷрои фаъолиятишон инфрасохтори мувофиқро талаб мекунанд. Ду заминаи асосии гузаронидани таҷрибаомӯзӣ базаи таълимию илмӣ Донишгоҳи давлатии Маскав дар минтақаи Бахчисаройи Қирим ва полигони геологӣ Зиддӣ ноҳияи Варзоби Тоҷикистон барои гузаронидани таҷрибаомӯзӣ имкониятҳои беназир доранд: фосилаи доимии васеи стратиграфии ҷинсҳо, доираи васеи навъҳои литологӣ ҷинсҳои таҳшинӣ, ҷинсҳои гуногуни магмавӣ ва метаморфӣ, маъданҳои генезиси гуногун, сохторҳои тектоникии қатъшуда ва қатъшаванда, шаклҳои геоморфологӣ, карст, кори баҳр, дарёҳо, пиряхҳо, ҷинсҳои муосир - аллювиалӣ, пиряхҳо, нишебӣҳо, омилҳои геологӣ антропогенӣ, ҷаишмаҳои маъданӣ ва оби ширин, инчунин хавфу оқибатҳои офатҳои табиӣ. Зарур аст, ки базаҳои таҷрибаомузии геологиро ҳамаҷониба инкишоф дода, дар ин базаҳо дар давраи зайримавсимӣ машқҳо, маршрутҳои туристӣ, конференсияҳо ва дигар чорабиниҳо таъкил карда шаванд.

Калидвожаҳо: таҷрибаомузии саҳроӣ, базаҳои таҷрибаомӯзӣ, равандҳои геологӣ, ёдгориҳои табиат, Бахчисарой, Қирим, Зиддӣ, Тоҷикистон.

GEOLOGICAL PRACTICES OF THE EARLY COURSES AND THEIR INFLUENCE ON THE PROFESSIONAL DEVELOPMENT OF GEOLOGISTS

Spiridonov A.V.¹, Salikhov F.S.²

Lomonosov Moscow State University¹

Lomonosov Moscow State University in Dushanbe²

Annotation. Field training of 1st and 2nd year students - field development of skills and methods of work is the most important stage of the curriculum, the foundation of all subsequent special disciplines. They require the appropriate infrastructure to carry them out. Two main bases for

conducting practices - the Crimean educational and scientific base of Moscow State University in the Bakhchisaray region of Crimea and the Ziddi geological site Ziddi in the Varzob region of Tajikistan have unique opportunities for conducting practices: a continuous wide stratigraphic interval of deposits, the widest range of lithological varieties of sedimentary rocks, various igneous and metamorphic rocks, minerals of various genesis, folded and discontinuous tectonic structures, landforms, karst, the work of the sea, rivers, glaciers, modern deposits - alluvial, glacial, slope, anthropogenic geological factors, mineral and freshwater sources, as well as the risks and consequences of natural disasters. It is required to develop bases of geological practices in every possible way. During the off-season, between practices, it should be possible to organize tourist routes, conferences and other events at these bases.

Keywords: field training practices, practice bases, geological processes, natural monuments, Bakhchisaray, Crimea, Ziddi, Tajikistan.

Сведения об авторах: **Спиридонов Александр Викторович** - старший научный сотрудник кафедры динамической геологии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Адрес: 119234, Российская Федерация, г. Москва, ул. Колмогорова, 1. **Тел.:** +7 (916) 563 57 52. **E-mail:** avspir@mail.ru.

Салихов Фарид Салохиддинович – д.г.-м.н., доцент, заведующий кафедрой “Науки о Земле” филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. **Адрес:** 734003. Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Бохтар, 35/1. **Тел.:** (+992 90) 400 09 99. **E-mail:** ffaarriidd@bk.ru.

Маълумот дар бораи муаллифон: **Спиридонов Александр Викторович** - ходими калони илмӣ, кафедраи геологияи динамикӣ, факултаи геология, Донишгоҳи давлатии Москва ба номи Ломоносов. **Суроға:** 119234, Федератсияи Россия, Москва, к. Колмогоров, 1. **Тел.:** +7 (916) 563 57 52. **E-mail:** avspir@mail.ru.

Салихов Фарид Салохиддинович – д.и. г. ва м., дотсент, мудири кафедраи илмҳо оид ба Замини филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи Ломоносов дар шаҳри Душанбе. **Суроға:** 734003, Ҷумҳурии Тоҷикистон, Душанбе, к. Бохтар, 35/1. **Тел.:** (+992 90) 400 09 99. **E-mail:** ffaarriidd@bk.ru.

Information about the authors: **Aleksandr Viktorovich Spiridonov** - Senior Researcher, Department of Dynamic Geology, Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University. **Address:** Kolmogorova Str. 1, Moscow, Russian Federation, 119234. **Phone:** +7 (916) 563 57 52. **E-mail:** avspir@mail.ru.

Farid Salokhiddinovich Salikhov – DSc in Geol. & Min., Associate Professor, Head of the Department of Earth Sciences, Lomonosov Moscow State University in Dushanbe. **Address:** Bokhtar Str. 35/1, Dushanbe, Tajikistan, 734003. **Phone:** (+992 90) 400 09 99. **E-mail:** ffaarriidd@bk.ru.

УДК: 550.8:004.9

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УЧАСТКОВ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ЮЖНОГО ГИССАРА НА ОСНОВЕ ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Файзиев Ф.А.¹, Каюмарси М.²

Таджикский национальный университет¹

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии

Национальной академии наук Таджикистана²

Аннотация. В статье представлена прогнозная оценка и картографирование перспективных участков минерализации Южного Гиссара на основе комплексного ГИС-моделирования. Южный Гиссар, ранее считавшийся малоперспективным в отношении ряда полезных ископаемых, по результатам проведённых авторами геолого-поисковых исследований характеризуется значительным рудным потенциалом, включающим скарново-полиметаллическое, жильное полиметаллическое, вольфрамовое и другие типы оруденения. В результате выполненного моделирования выделены и закартированы 37 перспективных скарновых свинцово-цинковых участков, 38 скарновых вольфрамовых и 25 гидротермальных полиметаллических площадей. Установлено, что зоны высоких приоритетов (1–2) преимущественно приурочены к контактам интрузивных тел с карбонатными толщами, узлам пересечения разломов, а также к зонам интенсивной тектонической нарушенности, что подтверждает ведущую роль структурно-тектонического контроля минерализации. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность комплексного ГИС-подхода при прогнозировании рудоносных зон в условиях ограниченных данных и могут быть использованы при планировании дальнейших поисково-разведочных работ в Южном Гиссаре.

Ключевые слова: Южный Гиссар, минеральный потенциал, прогнозная оценка, ГИС-моделирование, скарновое оруденение, полиметаллы, вольфрам, перспективные участки, UTM координаты.

Введение

Южный Гиссар до недавнего времени рассматривался как малоперспективный район в отношении многих видов полезных ископаемых. Однако результаты проведённых нами геолого-поисковых работ свидетельствуют о том, что данная территория обладает значительным рудным потенциалом и является перспективной для выявления различных видов полезных ископаемых, в частности скарново-полиметаллического, жильного полиметаллического, вольфрамового и других типов оруденения.

Часть полученных результатов была ранее обработана и опубликована нами в виде тезисов и научных статей [1-3]. В указанных работах рассмотрены типы оруденения, особенности руд, история изученности района, а также основные вопросы их генезиса.

Цель и задачи исследования

Интеграция информационных комплексов в географических информационных системах (ГИС) и построение карт минерального потенциала (Mineral Potential Mapping) осуществляется на основе анализа различных типов минерализации с последующим выделением и ранжированием приоритетных минерализованных зон. Подобный подход широко применяется в практике геолого-разведочных работ и подробно освещён в ряде фундаментальных исследований по прогнозному картированию полезных ископаемых с использованием ГИС-методов, включая интеграцию многокритериальных данных и пространственно-статистических моделей [4-7].

Использованные методы и оборудования

Следующим этапом исследования является моделирование и интеграция проанализированных информационных слоёв. На данном этапе тематические слои, сформированные на основе исходных данных (геологических, структурных, геофизических и геохимических параметров), объединяются с применением методов пространственного анализа. Это позволяет сформировать итоговую модель минерального потенциала и определить вероятные зоны локализации рудоносных тел [4, 5].

Для определения приоритетности и классификации перспективных зон часто используется гистограмма распределения значений модельных слоёв и алгоритм Natural Breaks (метод естественных разрывов), который позволяет позволяющий поделить данные на группы с минимальной внутригрупповой и максимальной межгрупповой неоднородностью. Данный статистический метод применяется для объективной классификации непрерывных пространственных данных перед построением тематических карт, особенно при прогнозировании минерального потенциала в ГИС-среде [6, 7].

Полученные результаты и их новизна

Следует отметить, что используемые значения параметров и критерии ранжирования во многом основаны на мировом опыте прогнозного картирования и геоинформационных исследований, включая моделирование с использованием вероятностных подходов и обучаемых алгоритмов [5, 7]. Однако в связи с отсутствием некоторых видов исходной информации (например, детальных геофизических или геохимических данных по всей исследуемой территории, результаты классификации могут быть нечёткими, что скажется на локализации прогнозных зон). Данное обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации карт минерального потенциала [4].

Все выделенные перспективные площади представлены в виде контуров прямоугольной и вытянутой формы и ранжированы по пяти уровням приоритетности (условные обозначения слева): приоритет 1 (красный цвет) – наиболее перспективные площади, характеризующиеся комплексом благоприятных признаков, включая наличие известных проявлений минерализации, интенсивную трещиноватость и узлы пересечения разломов, приоритет 2 (оранжевый цвет) – высокоперспективные участки, рекомендуемые для первоочередных поисково-оценочных работ, приоритет 3 (жёлтый цвет) – площади средней перспективности, выделенные по совокупности геолого-структурных и геофизических критериев, приоритет 4 (светло-зелёный цвет) – зоны вероятного развития минерализации, требующие уточняющих исследований, приоритет 5 (голубой цвет) – предварительно прогнозируемые

площади, выделенные по косвенным признакам. В целом зоны, отнесённые к первому-третьему приоритетам, характеризуются наибольшей вероятностью рудоносности. На рисунках 1-6 приведены итоговые модели различных категорий полезных ископаемых.

На рис. 1 представлена карта потенциальной скарновой минерализации свинца и цинка масштаба 1:25 000, составленная на основе комплексного анализа геологических, структурных и морфометрических данных.

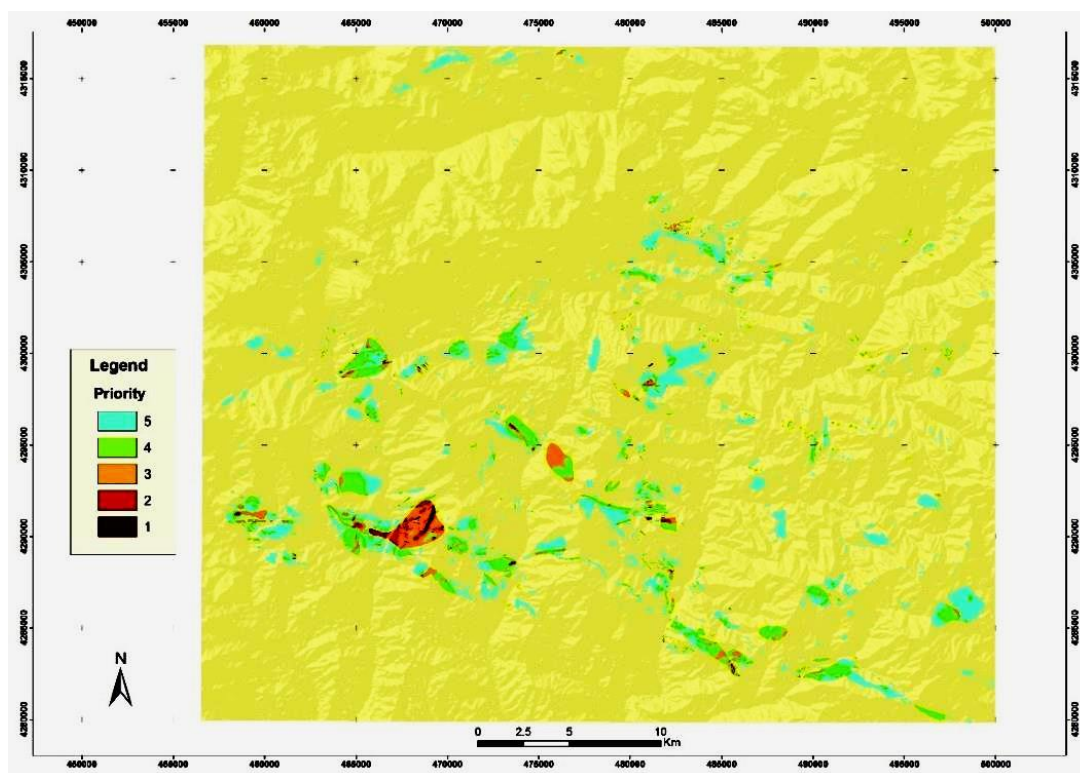


Рисунок 1. Карта прогнозной оценки потенциала скарновой минерализации свинца и цинка. Условные обозначения. 1 – красный цвет – наиболее перспективные площади, 2 – оранжевый цвет – перспективные площади, 3 – жёлтый цвет – площади средней перспективности, 4 – светло-зелёный цвет – площади вероятного развития минерализации, 5 – голубой цвет – предварительно прогнозируемые площади. На остальных рисунках (2-6) применяются аналогичные условные обозначения.

На карте выделены перспективные участки, классифицированные по степени приоритетности на пять классов (1-5). Зоны с высокой приоритетностью преимущественно приурочены к центральной и юго-западной частям исследуемой территории и пространственно связаны с тектоническими нарушениями, контактами интрузивных тел и участками расчленённого рельефа, что создаёт благоприятные условия для формирования скарновых месторождений свинцово-цинкового типа.

На рис. 2 представлена карта пространственного распределения 37 перспективных скарновых рудных участков полиметаллического типа, выделенных в пределах исследуемой территории. Перспективные участки показаны в виде контуров и локализуются преимущественно в зонах с высокой и средней приоритетностью (1-3), что свидетельствует о корректности прогноза и высокой информативности использованной модели оценки рудоносного потенциала. Наиболее высокая концентрация перспективных участков отмечается в центральной и юго-западной частях территории, где они приурочены к зонам тектонических нарушений, контактам интрузивных образований с карбонатными толщами, а также к участкам интенсивно расчленённого рельефа. Часть выделенных участков имеет вытянутую форму и приурочена к линейным структурным элементам, что указывает на контролирующую роль разломов и других разрывных нарушений в размещении скарновой минерализации. Участки, расположенные в зонах более низкой приоритетности (4-5), рассматриваются как второстепенно перспективные и требуют дополнительного уточнения на основе детальных геолого-геофизических и геохимических исследований.

На рис. 3 представлена карта потенциальной скарновой минерализации вольфрамового типа. Прогнозные зоны классифицированы по степени приоритетности (1–5), при этом участки с наиболее высоким потенциалом (1–2) отображены тёмными цветами и характеризуются ограниченным, но чётко выраженным площадным распространением. Данные зоны преимущественно приурочены к контактам интрузивных тел с карбонатными породами, а также к

зонам глубинных разломов, что соответствует классической модели формирования вольфрамовых скарнов.

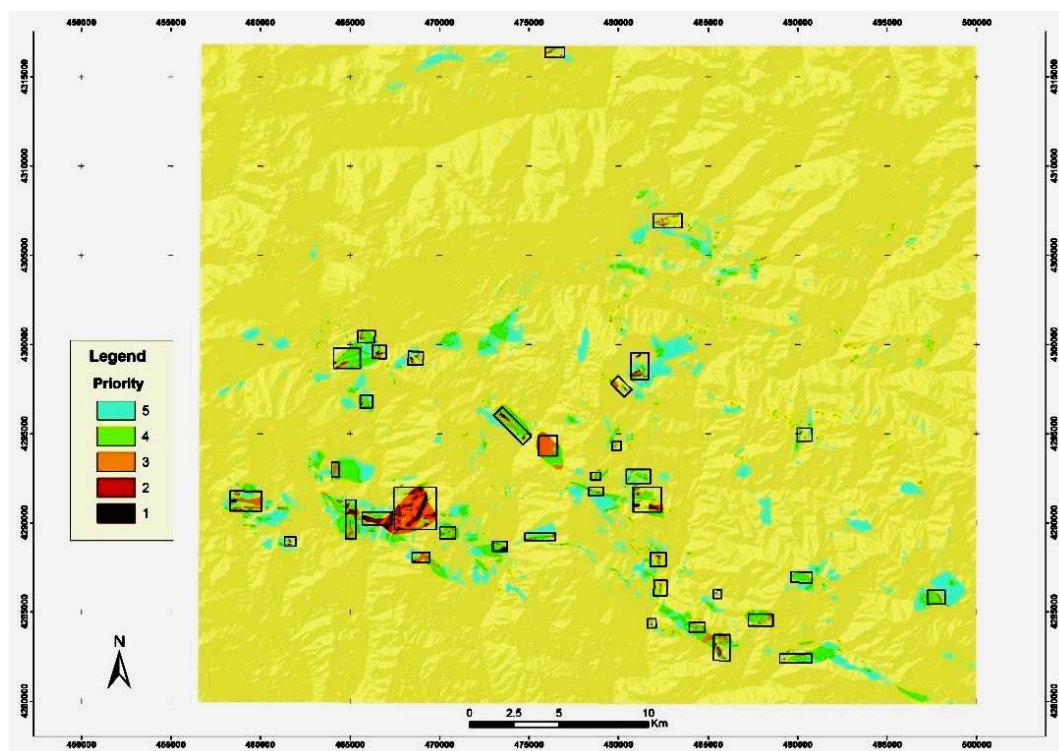


Рисунок 2. Карта расположения 37 перспективных скарновых рудных участков свинцово-цинкового типа

Участки со средним потенциалом (приоритет 3) формируют вытянутые линейные зоны, нередко совпадающие со структурами разломов, что указывает на их важную роль в миграции рудоносных флюидов. Зоны с низкой приоритетностью (4-5) занимают наибольшую часть исследуемой территории и рассматриваются как фоновые или слабо перспективные.

В целом, данная карта (рис. 3) демонстрирует более фрагментарный и локальный характер распределения скарновой вольфрамовой минерализации по сравнению со свинцово-цинковым типом, что отражает более жёсткие геолого-структурные условия её формирования. Выделенные участки с высокой приоритетностью могут рассматриваться в качестве первоочередных объектов

для проведения детальных геолого-поисковых работ, включая геохимическую съёмку, геофизические исследования и бурение.

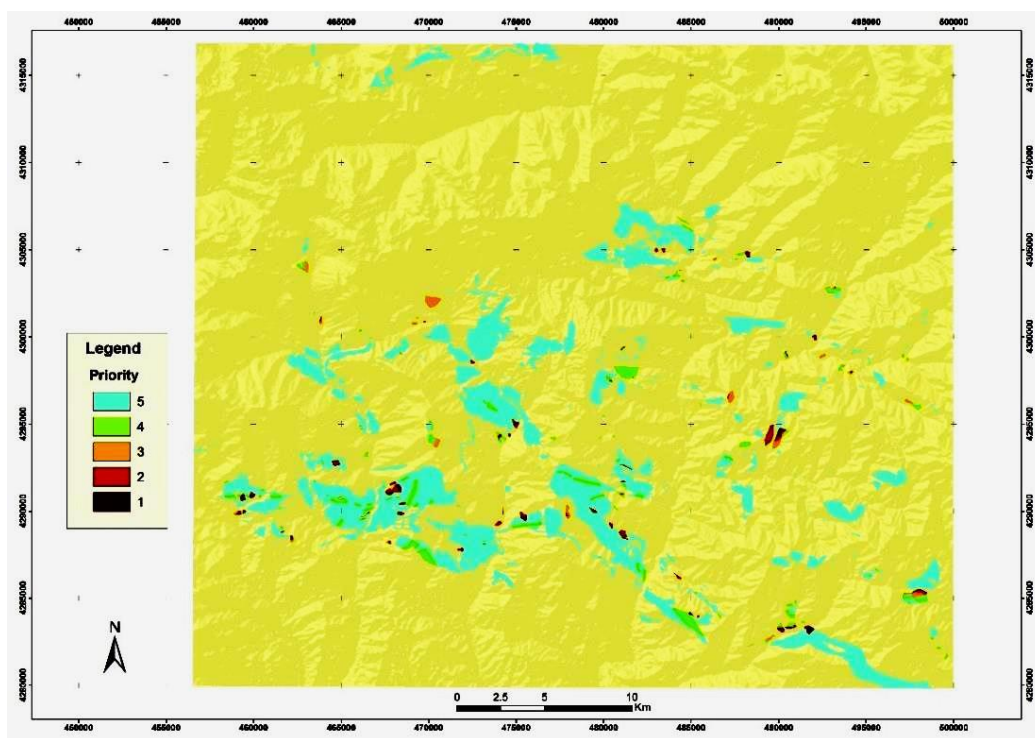


Рисунок 3. Карта прогнозной оценки потенциала скарновой минерализации вольфрамового типа

На рис. 4 представлена тематическая карта, отражающая пространственное распределение 38 перспективных скарновых рудных участков вольфрамового типа в пределах района Варзоб. Карта составлена на топографической основе с элементами рельефа и гидрографической сети, что позволяет оценить приуроченность рудных объектов к морфоструктурным и геологическим факторам.

Все перспективные участки показаны в виде контуров различной формы и окраски, соответствующей степени их приоритетности. Скарновые участки распределены по территории неравномерно и образуют отдельные группы и линейные цепочки, что указывает на их выраженный структурный контроль. Большинство из них приурочено к зонам тектонических нарушений и разломов, к контактам интрузивных тел с карбонатными толщами, а также к узлам

пересечения разломов различного направления. Отмечается вытянутость ряда участков в северо-западном и субширотном направлениях, что согласуется с региональной тектонической структурой и особенностями размещения скарновых тел.

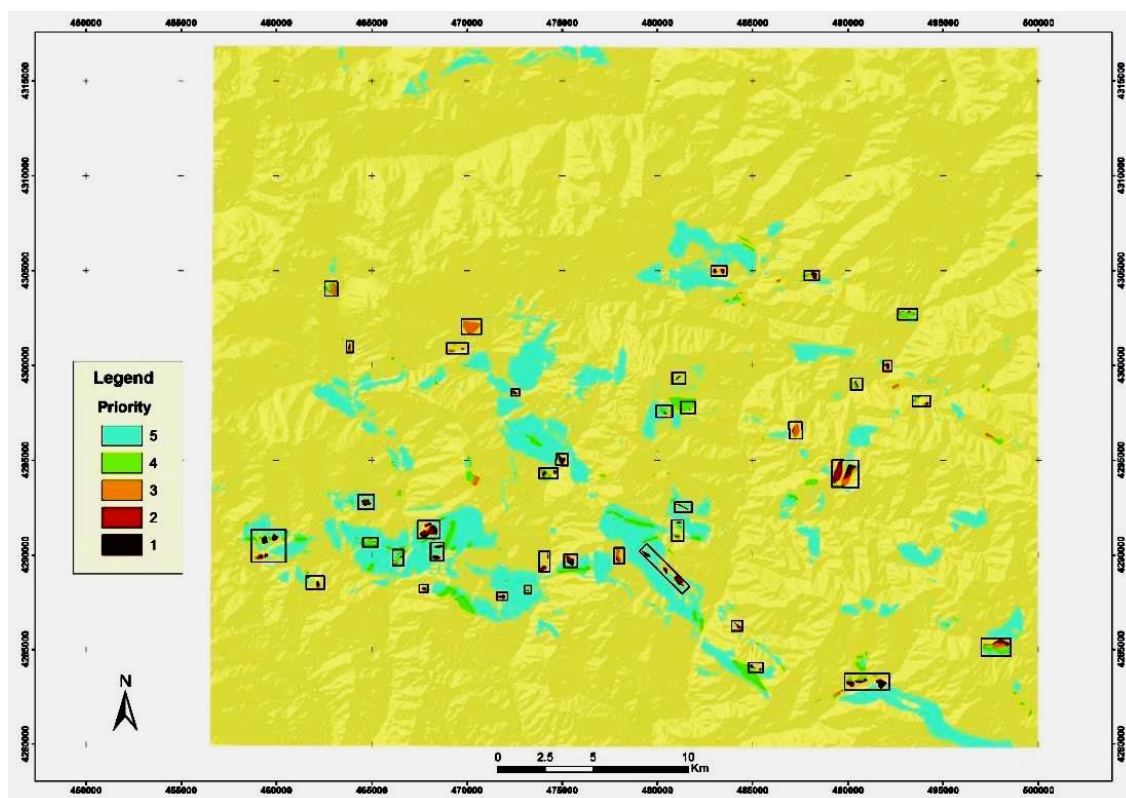


Рисунок 4. Карта расположения 38 перспективных скарновых рудных участков вольфрамового типа

Скарновые рудные участки вольфрамового типа, представленные на карте, сформированы в условиях контактового метасоматоза, связанного с внедрением интрузий кислого и среднего состава. Наличие участков с высокими приоритетами указывает на зоны интенсивного метасоматического преобразования пород, сопровождавшегося концентрацией вольфрамовых минералов, прежде всего шеелита и вольфрамита.

Участки 1–2 приоритетов предлагается рассматривать как первоочередные объекты для детальных поисков и опробования, тогда как участки 3–5 приоритетов разумно изучать на стадии региональных и поисково-оценочных

работ. В целом, рис. 4 наглядно показывает результаты прогноза скарновой вольфрамовой минерализации и служит подтверждением эффективности комплексного подхода.

На рис. 5 представлена карта потенциала гидротермального полиметаллического оруденения. Карта выполнена на топографической основе рельефа и отражает пространственное распределение зон различной перспективности для гидротермального полиметаллического оруденения. Фоновая часть территории показана светло-бежевым цветом, что соответствует областям с отсутствием или крайне низкой перспективностью оруденения. Перспективные зоны имеют линейно-вытянутую и пятнистую форму и приурочены преимущественно к долинам рек, зонам разломов, участкам пересечения линейных структур и зонам тектонических нарушений.

Наиболее выраженные концентрации зон высокого и очень высокого потенциала (приоритеты 1-2) отмечаются локально и часто имеют фрагментарный характер, что, вероятно, отражает периферийные зоны минерализации. Зоны среднего потенциала (приоритет 3) формируют ореолы вокруг более перспективных участков, что является типичной особенностью гидротермальных систем. Зоны низкого и очень низкого потенциала (приоритеты 4-5) сосредоточены преимущественно в центральной и южной частях карты, вдоль протяжённых структур северо-западного и субмеридионального простиранья.

Линейный характер выявленных аномалий указывает на контроль оруденения разломами и трещинными зонами, по которым происходила циркуляция гидротермальных флюидов. Концентрация участков с высокими значениями потенциала может свидетельствовать о наличии узлов гидротермальной активности, перспективных для поисков полиметаллических руд ($Pb-Zn-Cu \pm Ag, Au$). Распределение зон различной приоритетности отражает зональность гидротермальных процессов – от центральных высокопотенциальных участков к периферийным, менее перспективным областям.

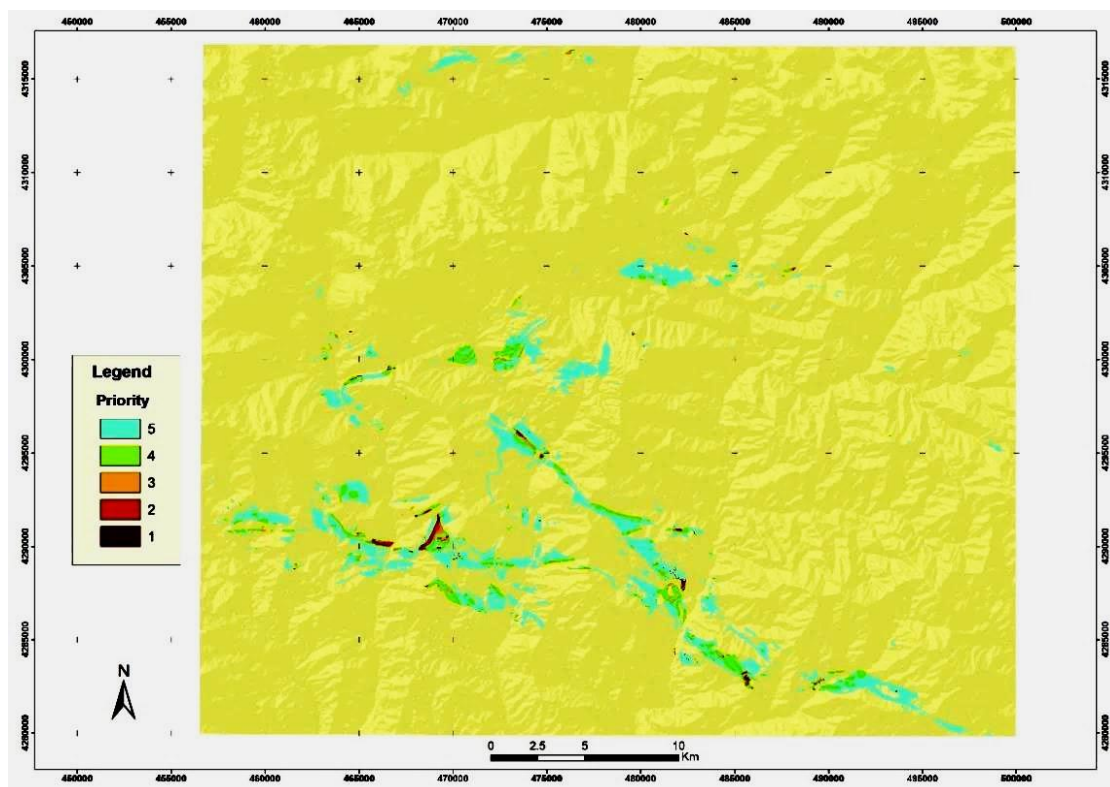


Рисунок 5. Изображение карты прогнозной оценки потенциала гидротермального полиметаллического оруденения

На рис. 6 представлена карта размещения 25 перспективных площадей гидротермального полиметаллического оруденения, выделенных по результатам комплексной оценки минерального потенциала территории. Карта составлена на основе цифровой модели рельефа с теневым отмывом, что позволяет наглядно проследить взаимосвязь перспективных участков с элементами рельефа и тектоническими структурами.

На карту наложена схема приоритетности (1–5) потенциала гидротермального полиметаллического оруденения, аналогичная представленной на рис. 5. Перспективные площади выделены прямоугольными контурами, что обеспечивает их чёткую локализацию и позволяет определить участки, рекомендованные для проведения дальнейших геологоразведочных работ.

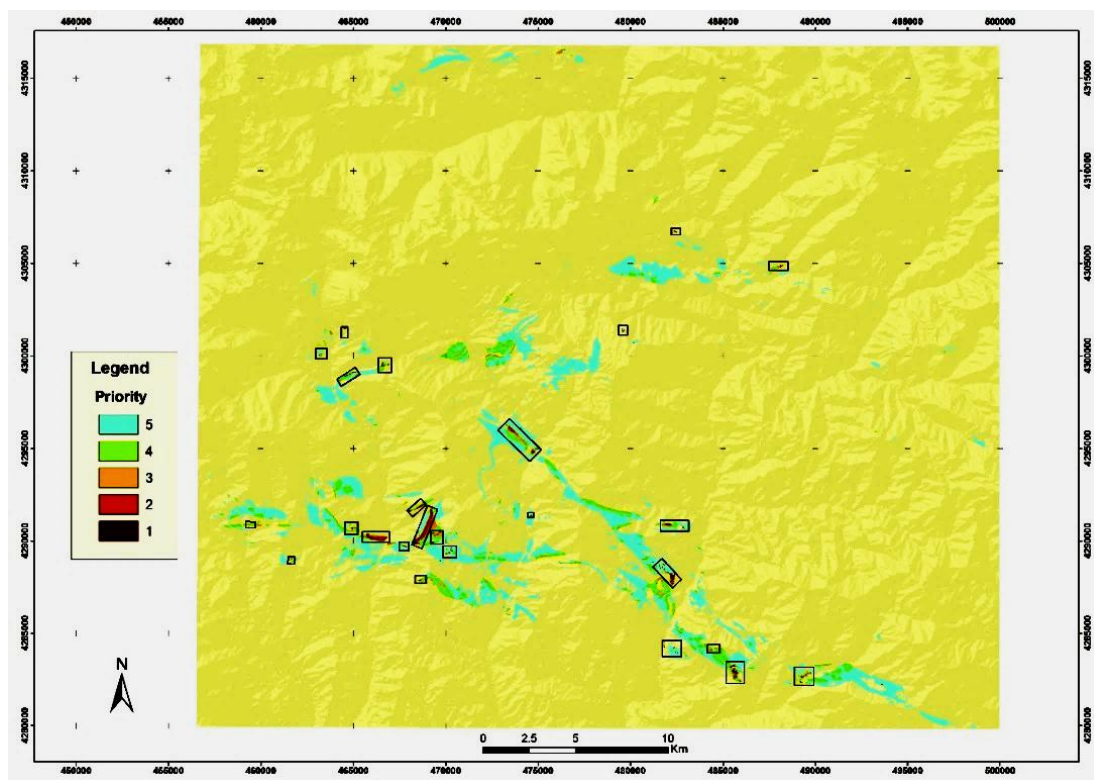


Рисунок 6. Изображение карты расположения 25 перспективных гидротермальных полиметаллических площадей

Всего на карте выделено 25 перспективных площадей, которые в целом распределены по территории достаточно равномерно, однако наиболее выраженная их концентрация отмечается в центральной и южной частях района. Большинство площадей имеет вытянутую форму, что указывает на их приуроченность к зонам разломов и трещин, линейным структурам северо-западного и субширотного простирания, долинам рек и зонам повышенной проницаемости пород. Отдельные площади совпадают с участками максимального потенциала (приоритет 1) и прилегающими к ним ореолами (приоритеты 2–3). Центральная часть территории характеризуется наибольшей концентрацией перспективных площадей, что, вероятно, связано с узлами пересечения разломов и активизацией гидротермальных процессов.

Обсуждение

Южная и юго-восточная части района демонстрируют цепочечное расположение перспективных площадей, отражающее протяжённые зоны

тектонических нарушений и каналы миграции гидротермальных флюидов. В северной части территории выделено меньшее количество таких площадей, что может свидетельствовать о более слабом развитии рудоконтролирующих факторов.

Таким образом, рис. 6 наглядно демонстрирует, что выделенные перспективные гидротермальные полиметаллические площади закономерно приурочены к зонам повышенного потенциала, контролируемым тектоническими структурами и элементами рельефа. Полученная карта подтверждает эффективность применённого подхода прогнозирования и может служить важной основой для планирования дальнейших геологоразведочных работ.

Выводы

В целом, результаты проведённых геолого-поисковых работ в пределах Южного Гиссара свидетельствуют о том, что данный регион, ранее рассматривавшийся как малоперспективный в отношении ряда полезных ископаемых, фактически обладает существенным минерально-сырьевым потенциалом. Полученные данные подтверждают высокую вероятность выявления скарново-полиметаллического, жильного полиметаллического и вольфрамового типов оруденения. Комплексная интеграция геолого-геофизических, геохимических и морфоструктурных материалов в ГИС-среде позволила сформировать обобщённые модели минерального потенциала исследуемой территории. Применение методов многокритериального анализа и алгоритма Natural Breaks обеспечило корректную и статистически обоснованную дифференциацию прогнозных участков по пяти уровням приоритетности. Установлено, что прогнозные зоны имеют выраженную пространственную связь с разломами, тектоническими нарушениями, контактами интрузивных тел с карбонатными толщами, а также узлами пересечения линейных структур. Это подтверждает определяющую роль структурно-тектонических факторов в формировании и размещении оруденения. Для скарновой свинцово-цинковой минерализации характерна концентрация наиболее перспективных участков в

центральной и юго-западной частях исследуемой территории. Вольфрамовая скарновая минерализация отличается более локальным и мозаичным распределением, что отражает более строгие геолого-структурные условия её образования. Гидротермальное полиметаллическое оруденение проявляется в виде линейно-вытянутых аномальных зон с выраженной пространственной зональностью, что свидетельствует о его контроле структурами разломов и путями циркуляции рудоносных флюидов. В целом, участки, отнесённые к 1–3 приоритетам, характеризуются наибольшей вероятностью рудоносности и должны рассматриваться как объекты первоочередных детальных поисково-оценочных работ, включая геохимические исследования, геофизическую съёмку и бурение. Зоны 4–5 приоритетов целесообразно изучать на региональном и уточняющем этапах. Несмотря на существующие ограничения, связанные с неполнотой исходной информации по отдельным районам, предложенный методический подход продемонстрировал высокую результативность и может служить надёжной основой для планирования геолого-5 разведочных работ и уточнения прогноза минерального потенциала региона.

Литература

1. Файзиев Ф.А., Каюмарси М. Формы рудных тел железорудного месторождения Средний Харангон // Материалы Респ. науч.-теорет. конф. профессорско-преподавательского состава и сотрудников ТНУ, посвященной 700-летию Мир Сайида Али Хамадони, Году семьи и Международному десятилетию действий «Вода для жизни» (2005-2015). – Душанбе, 2015. – С. 103-104.
2. Каюмарси М., Файзиев Ф.А. О возможности обнаружения медно-порфировых руд в пределах Южного Гиссара (Таджикистан) // Проблемы геологии и освоения недр: Тр. XXI Междунар. симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения М.И. Кучина – Томск: Томский политехнический университет, 2017. – Т. 1. – С. 161-162.

3. Каюмарси М. История изучения геологии Южного Гиссара (Центральный Таджикистан) // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. ТНУ. – 2023. – № 1. – С. 13-22.
4. Bonham-Carter G.F. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS / G.F. Bonham-Carter// – Oxford: Pergamon, 1994. – 398 p.
5. Carranza E.J.M. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS// – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 506 p.
6. Smith M.J., Goodchild M.F., Longley P.A. Geospatial analysis: a comprehensive guide// – London: Win Chelsea Press, 2007. – 704 p.
7. Mahmoodzadeh S., Pour A.B., Pourtaghi Z.S. et al. Mineral prospectivity mapping of porphyry Cu in GIS environment: a case study of Kerman, Iran // J. of Geochemical Exploration. – 2020. – Vol. 215. – P. 106-130.

АРЗЁБИИ ПЕШГЌИКУНӢ ВА ХАРИТАСОЗИИ ҚИТӢАӢОИ ОЯНДАДОРИ МИНЕРАЛИЗАТСИЯИ ӢИСОРИ ӢАНУБӢ ДАР АСОСИ МОДЕЛСОЗИИ СГИ

Файзиев Ф.А.¹, Каюмарси М.²

Донишгоҳи миллии Тоҷикистон¹

Институти геология, сохтмони ба заминҷунбӣ тобовар ва сейсмологияи

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон²

***Аннотатсия.** Дар мақола арзёбии пешгўишаванда ва харитасозии қитъаҳои дурнамоии минерализатсия дар минтақаи Ӣисори Ӣанубӣ дар асоси моделсозии маҷмуии системаи геоинформатсионӣ пешниҳод шудааст. Ӣисори Ӣанубӣ, ки қаблан нисбат ба бисёр навъҳои канданиҳои фойданок дурнамои камдошта арзёбӣ мешуд, тибқи натиҷаҳои корҳои геологӣ ҷустуҷўии муаллифон дорои потенциали назарраси маъданӣ мебошад, аз ҷумла минерализатсияи скарнии полиметаллӣ, рагии полиметаллӣ, волфрам ва дигар намудҳои маъдан. Дар натиҷаи моделсозӣ 37 қитъаи дурнамоии скарнии сурбу руҳдор, 38 қитъаи скарнии волфрамдор, 25 майдони ҳидротермалии полиметаллӣ ва 38 қитъаи рагии полиметаллӣ ҷудо ва ба харита ворид карда шуданд. Муайян гардид, ки минтақаҳои дорои дараҷаи баланди афзалият (1–2) асосан ба тамоси ҷисмҳои интрузивӣ бо қабатҳои карбонатӣ, гиреҳҳои буриши шикастаҳо ва минтақаҳои вайроншавии шадиди тектоникӣ*

вобаста мебошанд, ки назорати сохторӣ-тектоникии минерализатсияро тасдиқ менамояд. Натиҷаҳо самаранокии баланди усули мураккаби ГИС-ро барои пешгӯии минтақаҳои маъданнок дар шароити маҳдудияти маълумот тасдиқ намуда, метавонанд барои банақшагирии корҳои минбаъдаи ҷустуҷӯию иктишофӣ дар минтақаи Ҳисори Ҷанубӣ истифода шаванд.

Калидвожаҳо: Ҳисори Ҷанубӣ, иқтидори маъданӣ, арзёбии пешгӯишаванда, моделсозии системаи геоинформатсионӣ, маъдани скарнӣ, полиметаллҳо, волфрам, қитъаҳои ояндадор, координатаҳои UTM.

PREDICTIVE ASSESSMENT AND MAPPING OF PROMISING MINERALIZATION AREAS OF SOUTHERN HISOR BASED ON GIS MODELING

F.A. Fayziev¹, M. Kayumarsi²

Tajik National University¹

Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology

National Academy of Sciences of Tajikistan²

Annotation. The article presents a predictive assessment and mapping of prospective mineralization areas in the Southern Hisor based on integrated GIS modeling. The Southern Hisor, previously regarded as having low potential for several types of mineral resources, is characterized – according to the results of geological prospecting studies conducted by the authors – by significant ore potential, including skarn-type polymetallic, vein-type polymetallic, tungsten, and other types of mineralization. As a result of the modeling, 37 prospective skarn lead–zinc sites, 38 skarn tungsten sites, and 25 hydrothermal polymetallic areas were identified and mapped. High-priority zones (1–2) were found to be predominantly associated with contacts between intrusive bodies and carbonate formations, fault intersection nodes, and zones of intense tectonic deformation, confirming the decisive role of structural and tectonic control over mineralization. The results confirm the high efficiency of an integrated GIS-based approach for predicting mineralized zones under limited data conditions and can be used to plan further exploration activities in the Southern Hisor region.

Keywords: Southern Hisor, mineral potential, predictive assessment, GIS modeling, skarn mineralization, polymetals, tungsten, prospective areas, UTM coordinates.

Сведения об авторах: **Файзиев Фотех Абдувакилович** – д.г.-м.н., доцент кафедры геологии и горно-технического менеджмента Таджикского национального университета. **Адрес:** 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17. **Тел.:** (+992 93) 529 62 77. **E-mail:** geotravel.tj@mail.ru.

Махмадкарим Каюмарси – соискатель Института геологии, строительства, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана. **Адрес:** 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267. **Тел.:** (+992 93) 529 62 77. **E-mail:** geotravel.tj@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллифон: **Файзиев Фотех Абдувакилович** - д.и. г. ва м., дотсенти кафедраи геология ва менеҷменти маъдану техника. **Суроға:** 734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, х. Рӯдакӣ, 17. **Тел.:** (+992 93) 400 04 23. **E-mail:** foteh81@mail.ru.

Махмадкарим Каюмарс – унвонҷӯи Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, **Суроға:** 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Айни, 267. **Тел.:** (+992 93) 529 62 77. **E-mail:** geotravel.tj@mail.ru.

Information about the authors: **Fayziev Foteh Abdulvokilovich** – DSc in Geol. & Min., Associate Professor of the Department of Geology and Mineral and Technical Management Tajik National University. **Address:** Rudaki Ave. 17, Dushanbe, Tajikistan, 734025. **Phone:** (+992 93) 400 04 23. **E-mail:** foteh81@mail.ru.

Mahmadkarim Kayumarsi – PhD candidate at the Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan. **Address:** Aini Str. 267, Dushanbe, Tajikistan, 734063. **Phone:** (+992 93) 529 62 77. **Email:** geotravel.tj@mail.ru.

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОСЫПЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТАДЖИКИСТАНА

Файзуллоев Ш.А.

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии

Национальной академии наук Таджикистана

***Аннотация.** В статье представлены результаты исследования закономерностей формирования и распространения осыпей в Центральном Таджикистане с использованием геоинформационных технологий и методов пространственного моделирования. Для исследования была создана инвентаризационная карта осыпей на основе данных дистанционного зондирования и материалов Google Earth Pro, которая была разделена на обучающую и валидационную выборки. В ходе анализа изучено влияние факторов на развитие осыпных процессов и выявлены некоторые обратные закономерности. Для оценки точности модели проведён ROC-анализ. Результаты показали, что исключение факторов с обратной связью не повышает эффективность модели и существенно не влияет на качество прогнозирования модели.*

***Ключевые слова.** Модель, валидация, закономерность, осыпи, инвентаризационная карта, ROC-анализ, Google Earth Pro.*

Введение

Ранее Центральный Таджикистан был недостаточно исследован в инженерно-геологическом плане из-за слабой заселённости и малого объёма строительных работ. Но после приобретения Республики Таджикистан независимости население стало быстро увеличиваться и потребовались новые территории для освоения и заселения. Кроме того, происходящие в настоящее время климатические изменения предъявляют повышенное требование к детальности проводимых работ. В связи со стратегическими планами по быстрой индустриализации страны, обеспечению гидроэнергетической независимости, продовольственной безопасности и выхода из коммуникационного тупика Правительство Таджикистана ставит вопрос проведения инженерно-геологических работ на одно из первых мест [1].

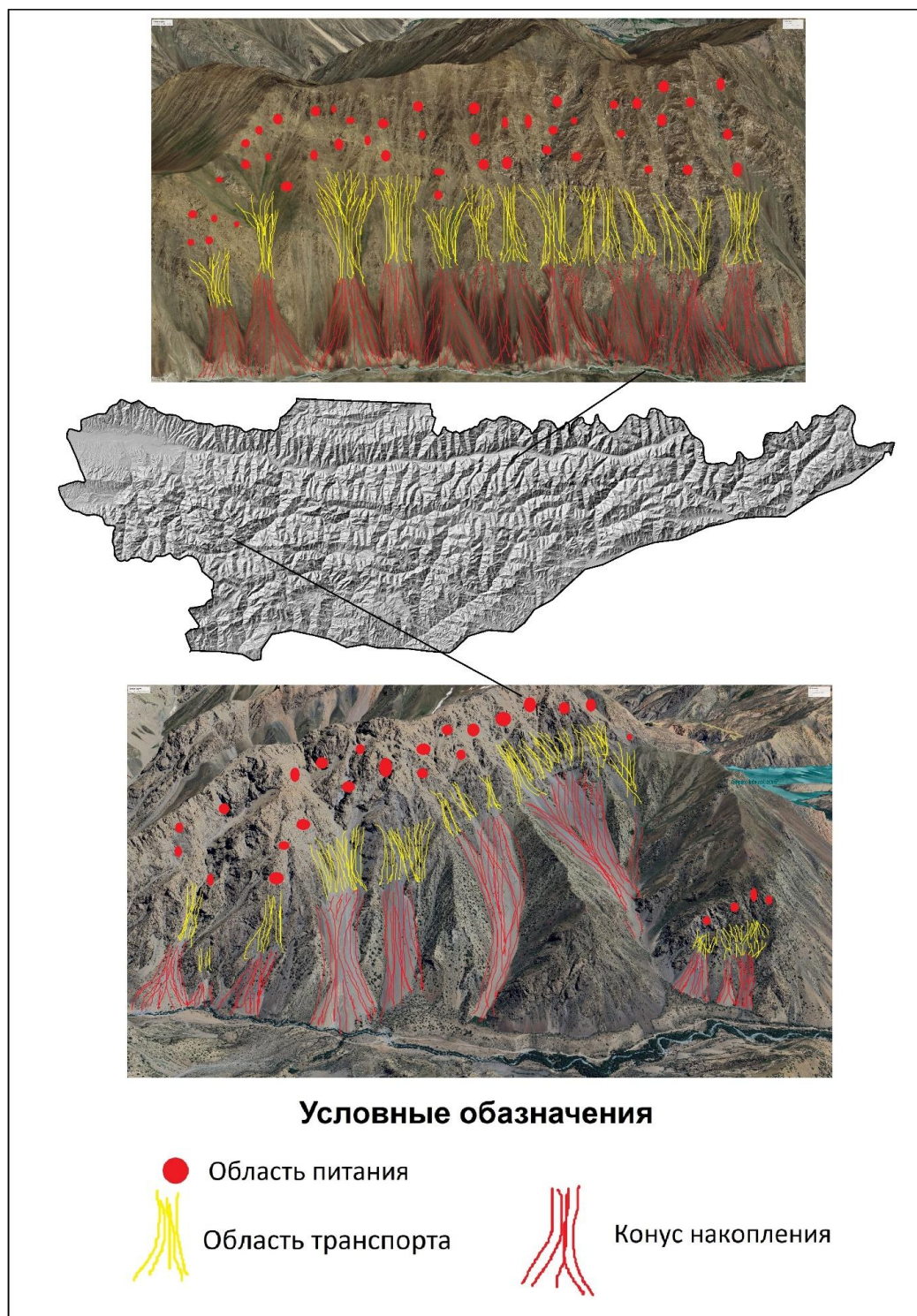


Рисунок 1. Схема распределения областей питания, транспорта и конусов накопления осыпей Центрального Таджикистана (Файзуллоев Ш.А.)

Для достижения данных целей решающее значение имеет изучение экзогенных геологических процессов, в том числе осыпей. Необходимо детально

изучать пространственные закономерности развития и распространения осыпей с применением новейших методов исследования.

Материалы и метод исследования

Для создания инвентаризационной карты осыпей Центрального Таджикистана дешифровка космических снимков Google Earth Pro является идеальным и общедоступным способом. Это не означает, что в нём не наблюдаются недостатки, и одним из них является невозможность обнаружения малых форм осыпей или, во всяком случае, сложность их обнаружения. В остальном дешифровка даёт возможность не только создать инвентаризационную карту осыпей, но и выделить некоторые их элементы. Например, выделить область питания, область транспорта и конус накопления (рис. 1).

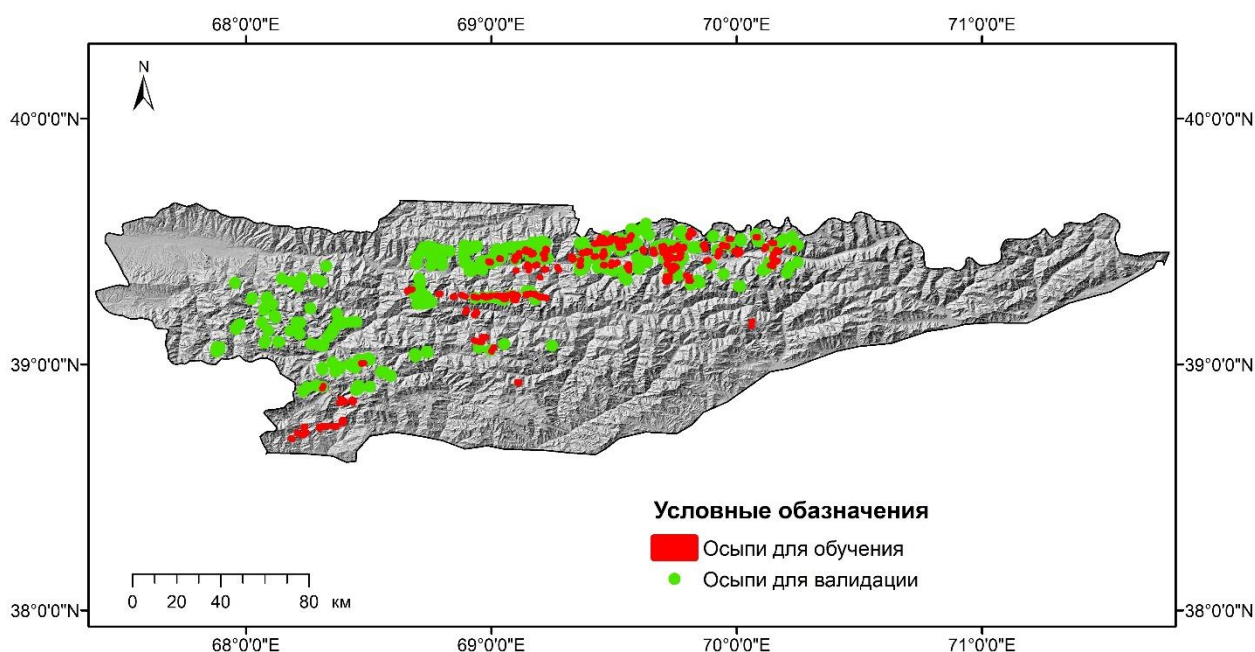


Рисунок 2. Инвентаризационная карта осыпей Центрального Таджикистана
(Файзуллоев Ш.А.)

При составлении инвентаризационной карты Центрального Таджикистана каждая осыпь была оцифрована строго начиная от области питания до конуса накопления. Изначально была составлена часть инвентаризационной карты, предназначенная для выявления зависимости осыпей от факторов их

образования. Затем была составлена вторая часть инвентаризационной карты, независимая от первой, которая используется для проверки работоспособности модели. В связи с тем, что инвентаризационная карта является одним из ключевых элементов моделирования и исходной пространственной основой, она составлялась с большой осторожностью и максимально возможной полнотой.

Модифицированный метод соотношения частотности является идеальным статистическим методом, который полностью способен решить вышеизложенные задачи в региональном масштабе. Данный метод был предложен авторами работ [3, 4] и расчёт выявления весового показателя факторов оползнеобразования осуществляется по нижеприведённой формуле:

$$FR_i = \frac{N_{cell}(S_i)/N_{cell}(N_i)}{\sum N_{cell}(S_i)/\sum N_{cell}(N_i)}, \text{ где}$$

FR_i – соотношение частотности;

$N_{cell}(S_i)$ – количество пикселей с оползнями в классе;

$N_{cell}(N_i)$ – количество пикселей в классе;

$\sum N_{cell}(S_i)$ – общее количество пикселей с оползнями на карте;

$\sum N_{cell}(N_i)$ – общее количество пикселей на карте.

Результаты исследования

Результаты анализа показали, что развитие осыпных явлений в Центральном Таджикистане определяется комплексным воздействием природных факторов, среди которых наибольшее значение имеют крутизна и экспозиция склонов, высотная зональность, сейсмичность, топо-гидрологические условия, тектонические нарушения и атмосферные осадки. Крутизна склонов является одним из главных факторов развития осыпей. Наиболее высокая вероятность их формирования наблюдается на склонах с крутизной 40-50°, где значение соотношения частотности составляет 1.85. Для склонов 30-40° показатель равен 1.41, а для склонов более 50° - 1.33. На склонах 20-30° значение составляет 0.91, тогда как на более пологих участках 10-20° и 0-10° показатели снижаются до 0.43 и 0.13, соответственно. Это свидетельствует о том, что осыпные процессы преимущественно развиваются на крутых и очень крутых склонах. Среди

экспозиций склонов наиболее благоприятные условия для развития осыпей характерны для склонов с восточной экспозиции, где значение соотношения частотности достигает 1.33. Для склонов с юго-восточной ориентации показатель соотношения частотности составляет 1.24, западной – 1.16, южной – 1.08 и юго-западной - 0.99. Склоны с северо-восточной экспозиции характеризуются значением соотношения частотности 0.84, северо-западной – 0.75, а северной – 0.49. Наиболее интенсивно осыпные явления развиваются в среднегорном поясе. Максимальное значение соотношения частотности отмечено на высотах 876-1000 м – 2.97. Высокие показатели также характерны для высот 2000 - 2500 м – 2.34, 1500–2000 м – 2.31 и 1000-1500 м – 1.53. На высотах 2500-3000 м значение соотношения частотности снижается до 1.04. Выше отметки 3000 м вероятность развития осыпей резко уменьшается: в диапазоне 3000-3500 м показатель соотношения частотности составляет 0.18, а выше 3500 м осыпные процессы практически не наблюдаются. Анализ профильной кривизны согласно результатов соотношения частотности показал, что наиболее высокая вероятность развития осыпей наблюдается при значениях 1.26-19.2, где коэффициент соотношения частотности составляет 1.35. Для класса $-23.9 \div -1.6$ значение равно 1.26, а при значениях $-1.6 \div -0.6$ показатель соотношения частотности составляет 1.00. На участках с диапазоном $-0.6 \div 0.24$ вероятность развития осыпей ниже — 0.89, тогда как для диапазона 0.24-1.26 значение увеличивается до 1.07. Наиболее высокая вероятность развития осыпных процессов отмечается при показателях плановой кривизны от -13.7 до -1, где значение соотношения частотности достигает 1.48. Для класса $-1 \div -0.3$ значение составляет 1.24. При значениях $-0.3 \div 0.21$ показатель соотношения частотности снижается до 0.91 и для диапазона [0.21-0.9] — до 0.88, а при значениях 0.9-14.5 составляет 0.92. Сейсмический фактор оказывает значительное влияние на развитие осыпей. В результате анализа выявлено, что максимальная вероятность их возникновения характерна для территорий с пиковым ускорением грунтов 0.29-0.64 g, где значение соотношения частотности составляет 2.18, хотя теоретически, самым значимым показателем

сейсмического воздействия должно быть его максимальное значение. Для диапазона 0.64-0.95 g коэффициент соотношения частотности равен 1.79. В интервале 0.95-1.24 g значение снижается до 0.93, а при более высоких значениях ускорения вероятность развития осыпей уменьшается до 0.17-0.44. Наиболее высокая вероятность развития осыпных явлений наблюдается на расстоянии 8000-10000 м от рек, где значение соотношения частотности достигает 1.83. Для диапазона 6000-8000 м показатель составляет 1.12, а для расстояния 2000-4000 м – 1.06. Вблизи рек, на расстоянии 0-2000 м, значение составляет 0.94. На расстояниях более 12000 м осыпные явления практически отсутствуют. Анализ топографического индекса влажности (TWI) показал, что наиболее благоприятные условия для развития осыпей характерны для диапазона 3.1-4.0, где значение соотношения частотности составляет 1.24. Для диапазона 4-5.5 показатель равен 0.96, а при значениях более 5.5 – 1.00.

В диапазоне 2.3-3.1 коэффициент соотношения частотности составляет 0.94, тогда как при минимальных значениях топографического индекса влажности (TWI) осыпные явления практически не наблюдаются. Наиболее высокая вероятность развития осыпей наблюдается при значениях индекса мощности потока (SPI) более 30, где показатель соотношения частотности составляет 1,22. Для диапазонов 24–30 и 18–24 значения равны 0,83 и 0,80 соответственно. При значениях 12–18 показатель составляет 0. 52, при 6÷12 — 0.24, а при 0÷6 — 0.65. Наиболее высокая вероятность их формирования отмечается на расстоянии 9-12 км от разломов, где значение соотношения частотности достигает 1.64, хотя теоретически, самым высоким весом должен обладать первый класс этого фактора.

Таблица. Результаты расчётов соотношения частотности

Факторы	Класс	$N_{cell}(N_i)$	$\sum N_{cell}(N_i)$	$N_{cell}(S_i)$	$\sum N_{cell}(S_i)$	FRi
Крутизна склонов (в градусах)	0-10	3078427	32776359	649	53579	0,13
	10-20	6229446		4332		0,43
	20-30	9775237		14456		0,91
	30-40	9104175		20995		1,41
	40-50	3686611		11146		1,85
	>50	921634		2001		1,33
Экспозиция склонов	Ровная	19646	32776359	0	53579	0,00
	Северная	3746597		2992		0,49
	Северо-восточная	3777503		5207		0,84
	Восточная	4289759		9344		1,33
	Юго-восточная	4267248		8645		1,24
	Южная	4384690		7747		1,08
	Юго-западная	4130061		6703		0,99
	Западная	4312697		8173		1,16
	Северо-западная	3867329		4768		0,75
Высотная зональность (м)	876-1000	133704	32776359	649	53579	2,97
	1000-1500	1736870		4332		1,53
	1500-2000	3826243		14456		2,31
	2000-2500	5482611		20995		2,34
	2500-3000	6532737		11146		1,04
	3000-3500	6720877		2001		0,18
	3500-4000	5930187		0		0,00
	4000-5529	2432301		0		0,00
Профильная кривизна	-23,9--1,6	1347704	32776359	2771	53579	1,26
	-1,6--0,6	4487491		7299		1,00
	-0,6-0,24	15669517		22749		0,89
	0,24-1,26	9052476		15815		1,07
	1,26-19,2	2237492		4945		1,35
Плановая кривизна	-13,7--1	1741067	32776359	4207	53579	1,48
	-1--0,3	6647895		13507		1,24
	-0,3-0,21	13522584		20026		0,91
	0,21-0,9	8812949		12730		0,88

	0,9-14,5	2070188		3109		0,92
Пиковое ускорение грунтов	0,29-0,64	5316779	32776359	18997	53579	2,18
	0,64-0,95	6314009		18463		1,79
	0,95-1,24	6420148		9796		0,93
	1,24-1,59	9741760		2765		0,17
	1,59-1,93	4958983		3558		0,44
Расстояние до рек (м)	0-2000	8584339	32776359	13165	53579	0,94
	2000-4000	8024060		13880		1,06
	4000-6000	6345278		8889		0,86
	6000-8000	4515490		8248		1,12
	8000-1000	2728286		8174		1,83
	1000-1200	1328481		1223		0,56
	>12000	1269718		0		0,00
TWI	1,4-2,3	1363	32776359	0	53579	0,00
	2,3-3,1	85805		132		0,94
	3,1-4	2345026		4747		1,24
	4-5,5	13687605		21382		0,96
	>5,5	16656557		27318		1,00
SPI	0-6	6346230	32776359	6785	53579	0,65
	6-12	1280384		495		0,24
	12-18	1790462		1525		0,52
	18-24	1625182		2117		0,80
	24-30	1278961		1727		0,83
	>30	20455140		40930		1,22
Расстояние до разломов (км)	0-3	8145723	32776359	13307	53579	1,00
	3-6	7413779		14169		1,17
	6-9	6278427		13463		1,31
	0-12	4524773		12087		1,64
	>12	6433008		553		0,05
Атмосферные осадки (мм/год)	384-450	231562	32776359	0	53579	0,00
	450-500	3352024		0		0,00
	500-550	4001476		0		0,00
	550-600	7503255		7873		0,64
	600-690	17752040		46014		1,58

Для диапазона 6-9 км показатель составляет 1.31, а для расстояния 3-6 км — 1.17. В непосредственной близости к разломам, на расстоянии 0-3 км, значение равно 1.00, тогда как на расстоянии более 12 км показатель резко снижается до 0.05. По результатам анализа карты атмосферных осадков обнаружено, что максимальная вероятность их формирования наблюдается в районах с количеством атмосферных осадков 600-690 мм в год, где значение соотношения частотности составляет 1.58. В диапазоне 550-600 мм показатель снижается до 0.64. В районах с количеством осадков менее 550 мм развитие осыпных процессов практически не наблюдается.

Все факторы, которые дали обратный эффект при составлении первой модели восприимчивости (рис. 3) были исключены. Целью их исключения было повышение прогностической способности модели. Вторая модель, которую можно видеть на рисунке 3, была составлена исключительно на основе всех анализируемых факторов.

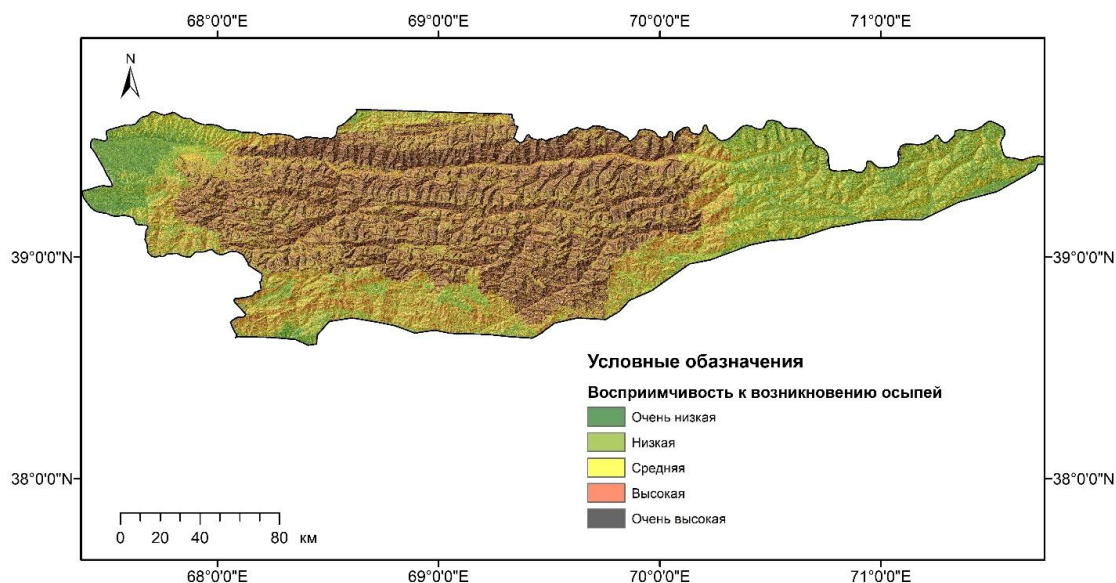


Рисунок 3. Карта восприимчивости территории Центрального Таджикистана к возникновению осыпей с исключением некоторых факторов
(Файзуллоев Ш.А.)

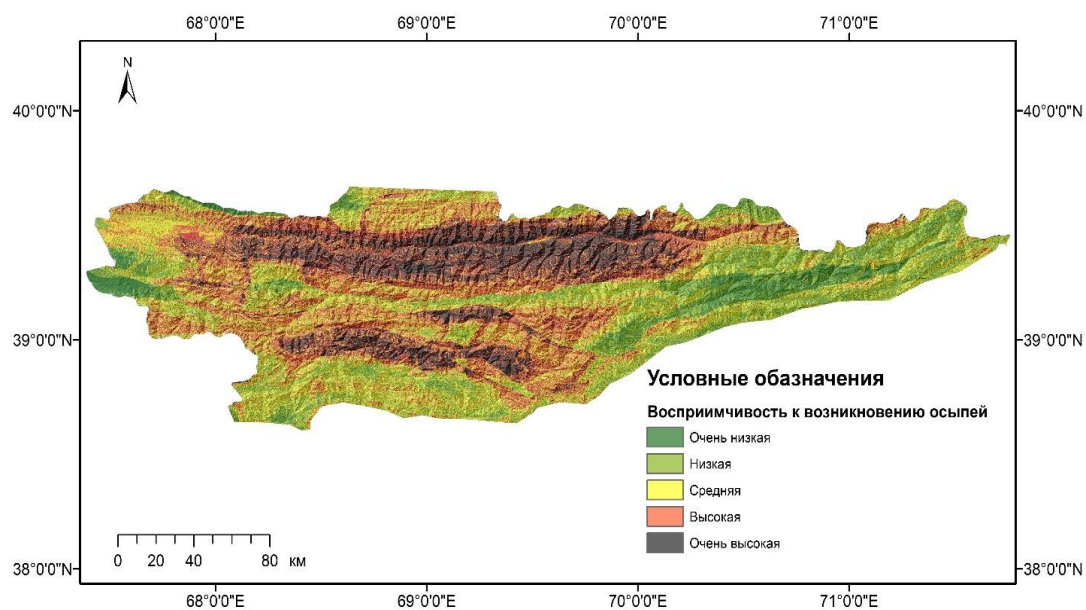


Рисунок 4. Карта восприимчивости территории Центрального Таджикистана к возникновению осыпей с применением всех факторов (Файзуллоев Ш.А.)

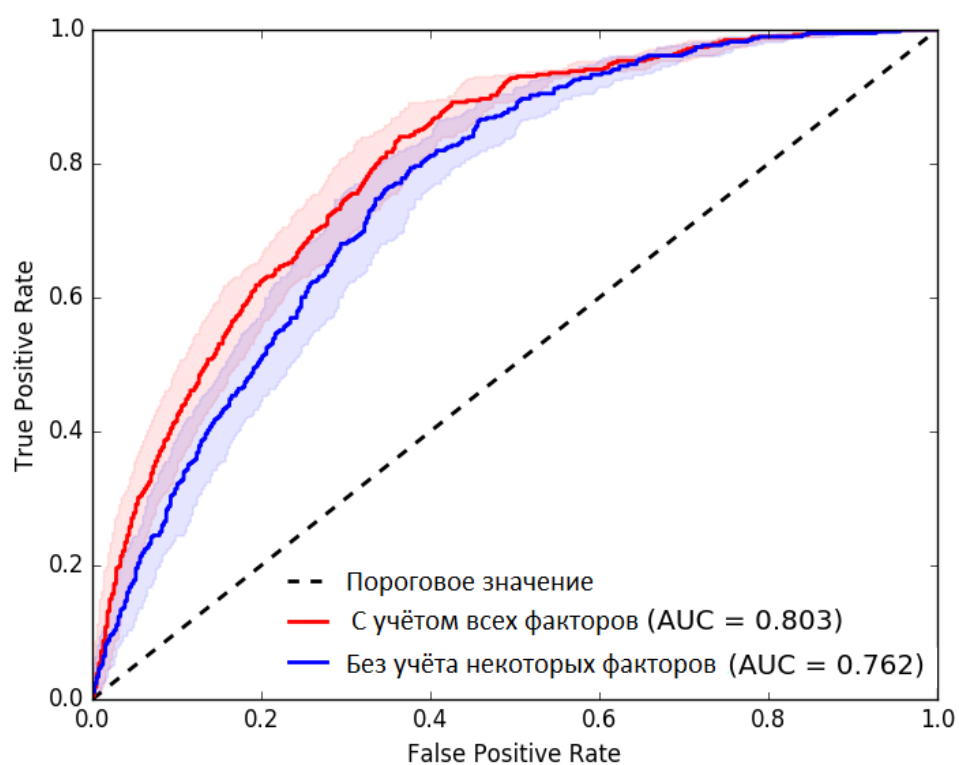


Рисунок 4. Результаты валидации моделей (Файзуллоев Ш.А.)

По результату валидации выявлено, что пусть и с небольшим перевесом, но модель, в которой учтены все факторы имеет более высокую прогностическую способность. В связи с этим, перед тем, как исключить факторы из модели, необходимо проводить оценку точности созданных моделей и только после этого переходить к окончательному выводу.

Выводы

Самыми благоприятными склонами для развития осыпей являются склоны с крутизной 50° , ориентированные на восток. Эти же склоны становятся более уязвимыми, если они находятся на высотных отметках от 876 до 3000 м. Выявлено, что топографический индекс влажности, расстояние до рек, расстояние до разломов и пиковое ускорение грунтов имеют обратную зависимость с развитием осыпей. Обнаружено, что, кроме второго и третьего классов профильной кривизны, все остальные приобрели значения соотношения частотности выше единицы. При анализе плановой кривизны наблюдается иная картина, поскольку только первый и второй классы этого фактора имеют значения соотношения частотности выше единицы. Для создания данной модели также были использованы два топогидрологических фактора. По результатам их анализа выявлено, что осыпи имеют весьма наглядную связь с последним классом индекса мощности потока. Топографический индекс влажности также показал обратную зависимость. Анализ соотношения частотности атмосферных осадков показал, что развитие осыпей более вероятно на склонах, расположенных в зонах с максимальным количеством атмосферных осадков.

При выявлении пространственных закономерностей осыпных явлений Центрального Таджикистана по отношению к некоторым факторам (топографический индекс влажности, расстояние до рек, расстояние до разломов и пиковое ускорение грунтов) были обнаружены обратные зависимости. Однако при их исключении из модели было выявлено, что прогностическая способность модели снижается на 5 %.

Литература

1. Файзуллоев Ш.А. Анализ некоторых факторов развития оползневых явлений Центрального Таджикистана// Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2025. – Т. 68. – № 2. – С. 184-189.
2. Файзуллоев Ш.А. Об оползневой восприимчивости территории Таджикистана// Доклады национальной академии наук Таджикистана. – 2025. – Т. 68. – №8. – С. 778-786.
3. Файзуллоев Ш.А. Морфометрические предпосылки оползней// Наука и инновация. Серия геологических и технических наук, ТНУ. – 2025. – № 4. – С. 32-39.

ТАҲЛИЛИ РУШДИ САНГРЕЗИШҶО ДАР ТОҶИКИСТОНИ МАРКАЗӢ

Файзуллоев Ш.А.

Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмология

Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Аннотатсия. Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқи қонуниятҳои ташаққули ва паҳншавии сангрезии дар Тоҷикистони Марказӣ бо истифода аз технологияҳои геоинформатсионӣ ва усулҳои моделсозии фазоӣ пешниҳод шудаанд. Барои анҷом додани таҳқиқот харитаи инвентаризатсионии сангрезии дар асоси маълумоти таҳқиқоти фотосателлитӣ ва маводи Google Earth Pro таҳия гардида, ба интиҳобҳои омӯзишӣ ва санҷишӣ ҷудо карда шуд. Дар рафти таҳлил таъсири омилҳои табиӣ ба рушди равандҳои сангрезии омӯхта шуда, баъзе қонуниятҳои баръакс муайян гардиданд. Барои арзёбии дақиқии модел таҳлили ROC гузаронида шуд. Натиҷаҳо нишон доданд, ки хориҷ намудани омилҳои, ки робитаи баръакс доранд, самаранокии моделро баланд намебардорад ва ба сифати пешгӯӣ таъсири ҷиддӣ намерасонад.

Калидвожаҳо: модел, санҷиш, қонуният, резисиансҳо, харитаи инвентаризатсионӣ, таҳлили ROC, Google Earth Pro.

ANALYSIS OF TALUS DEVELOPMENT IN CENTRAL TAJIKISTAN

Sh.A. Fayzulloev

*Institute of Geology, Seismological Construction and Seismology
of the National Academy of Sciences of Tajikistan*

Annotation. *The article presents the results of a study on the patterns of talus formation and distribution in Central Tajikistan using geoinformation technologies and spatial modeling methods. For the study, a talus inventory map was created based on remote sensing data and materials from Google Earth Pro, which was divided into training and validation datasets. During the analysis, the influence of natural factors on the development of talus processes was examined, and several inverse patterns were identified. ROC analysis was carried out to assess the accuracy of the model. The results showed that excluding factors with inverse relationships does not improve the model efficiency and does not significantly affect the prediction quality.*

Keywords: *model, validation, pattern, talus, inventory map, ROC analysis, Google Earth Pro.*

Сведения об авторе: Файзуллоев Шохнаваз Абдукодирович – к.г.-м.н., старший научный сотрудник группы геоинформационных систем и дистанционного зондирования Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана. Адрес: 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267. Тел.: (+992 55) 558 47 58. E-mail: shohnavaz.faizulloev@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллиф: Файзуллоев Шохнаваз Абдукодирович – н.и.г.-м., ходими калони илмӣ гурӯҳи технологияи геоиттилоотӣ ва тадқиқоти ғосилавии Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон. Суроға: 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Айнӣ, 267. Тел.: (+992 55) 558 47 58. E-mail: shohnavaz.faizulloev@mail.ru.

Information about the author: Faizulloev Shohnavaz Abduqodirovich – Cand. Sc. in Geol. and Min., Lead researcher of the Geo-Information System and remote sensing group of the Institute of Geology, Seismological Construction and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Address: Aini Str. 267, Dushanbe, Tajikistan, 734063. Phone: (+992 55) 558 47 58. E-mail: shohnavaz.faizulloev@mail.ru.

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОНОСНЫХ УГЛЕЙ КАМЕННОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФАН-ЯГНОБ

Фозилов Д.Н.¹, Саидов М.С.²

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии

Национальной академии наук Таджикистана¹

Филиал Московского государственного университета имени

М.В. Ломоносова в городе Душанбе²

***Аннотация.** В условиях возрастающей потребности в комплексном использовании природных ресурсов особую актуальность приобретает исследование металлоносности каменных углей. В настоящей работе рассматриваются прогнозно-поисковые критерии выявления углей, обогащённых редкоземельными и благородными металлами, на примере Фан-Ягнобского месторождения (Таджикистан). Показано, что природные угли в ряде геолого-генетических условий могут служить источником ценных элементов, включая германий, литий, скандий и др., аккумуляция которых обусловлена процессами сорбции на стадии торфообразования. Проведён анализ геолого-структурных и стратиграфических особенностей месторождения, уточнены литолого-стратиграфические параметры угленосных отложений и угольных пластов. На основе полученных данных обоснована необходимость проведения детальных геохимических исследований с целью выявления перспективных участков, характеризующихся повышенными концентрациями ценных компонентов. Полученные результаты подчёркивают значение Фан-Ягнобского месторождения как потенциального источника комплексного минерального сырья, представляющего интерес для промышленной переработки.*

***Ключевые слова:** каменный уголь, редкоземельные металлы, геохимия, угленосные отложения, Фан-Ягноб, Таджикистан, прогнозно-поисковые критерии, комплексное сырьё.*

Введение

Актуальность исследования. Современные мировые тенденции рационального природопользования обусловлены необходимостью комплексного использования минерального и органического сырья. В этом

контексте особый интерес представляют природные угли, которые рассматриваются как нетрадиционное и, в то же время, перспективное сырьё, способное содержать редкоземельные и драгоценные металлы.

Накопление редких и благородных металлов в бурых и каменных углях связано с особенностями их формирования. В процессе образования угольных пластов значительную роль играют водные потоки, циркулирующие в торфяных болотах. Торф, сформированный из остатков растительных организмов, обладает выраженной способностью к аккумуляции различных ионов, в том числе ионов редкоземельных и драгоценных металлов. В результате указанные элементы сорбируются как торфяным веществом, так и пористой структурой угля.

Следует отметить, что редкоземельные и благородные цветные металлы присутствуют в углях преимущественно в форме комплексных ионов, коллоидных частиц и наночастиц. Процессы сорбции металлов и гуминовых кислот в среде разложения растительных остатков достаточно подробно описаны в научной литературе, при этом определены константы образующихся продуктов соответствующих реакций.

Вместе с тем на протяжении длительного времени содержание редкоземельных и драгоценных металлов в углях определялось аналитическими методами, занижавшими их реальные концентрации на 2–3 порядка. Лишь в последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к проблеме металлоносности угольных отложений. Ведутся активные исследования, направленные на извлечение цветных и драгоценных металлов из бурых и каменных углей, а также из золошлаковых отвалов предприятий энергетики и цветной металлургии.

Общие сведения о металлоносности углей. По данным литературных источников, бурые и каменные угли ряда месторождений характеризуются присутствием благородных металлов — золота, серебра, платины, а также элементов платиновой группы (палладий, осмий, иридий), и других редких и рассеянных элементов, включая германий, галлий, иттрий, иттербий, литий,

бериллий, скандий, стронций, цирконий, ниобий, рубидий, индий, селен, лантан, торий и гафний [5, 6]. Установлено [6], что как содержание, так и скорость высвобождения металлических частиц в значительной степени зависят от генетического типа угля и геологических условий формирования угольных месторождений.

В бассейне р. Зеравшан разведаны и подсчитаны запасы угля по трем месторождениям: Магианскому, Кштут-Зауранскому и Фан-Ягнобскому (Раватскому). Общие разведанные запасы угля равны 900.0 млн. т, в том числе по промышленным категориям – 558.0 млн. т, что составляет более 80 % запасов по республики. Угольные месторождения в промышленных масштабах не эксплуатируются. Для развития угледобывающей промышленности наибольший интерес представляет Фан-Ягнобское месторождение высококачественных коксующихся углей, расположенное в 40 км к югу от райцентра Айни. Месторождение вытянуто узкой полосой в северо-западном направлении на 32 км. Угленосные отложения юрского возраста слагают крупную синклинальную структуру. Юго-западное крыло синклинали срезано надвигом, имеющим амплитуду до 1700 м. В угленосной свите мощностью более 500 м выявлено более 25 угольных пластов, из которых более половина характеризуются рабочей мощностью. «Угли характеризуются содержанием влаги гигроскопической 0.25-2.62%, золы – 3.2-38%, летучих веществ на горючую массу – 20.7 – 40.5%, серы – 0.17-6.8%; углерода – 79-87%, водорода – 4.7÷ 6.3%. Теплотворная способность горючей массы угля изменяется от 7730 до 8773 ккал/кг» [4, с. 81].

Горнотехнические условия месторождения позволяют производить вскрытие шахтного поля штольнями.

Геологическое и стратиграфическое положение Фан-Ягнобского месторождения. Фан-Ягнобское каменноугольное месторождение характеризуется сложным стратиграфическим и тектоническим строением, обусловленным его положением в пределах Фанских гор — на северном склоне Гиссарского и южном склоне Зеравшанского хребтов. Месторождение

охватывает долину реки Ягноб между притоками Джижикрут и Пасруд, а также участок правобережья Ягноба, где угленосные пласты прослеживаются до верховий урочища Кухи Малик.

Угленосные отложения приурочены к ниже- и среднеюрским толщам и представлены чередованием угольных пластов, глин, песчаников и алевролитов. Мощность угольных пластов варьирует в широких пределах: от тонких (0.5–1.5 м) до средних (1.5–3.0 м) и мощных (более 3 м). Углы падения пластов составляют 30–44°, что отражает интенсивное тектоническое воздействие на структуру месторождения [7].

Стратиграфический разрез включает ряд угольных пластов, среди которых наибольшее практическое значение имеют пласты № 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12 и 13. Они отличаются по мощности, качеству угля и условиям залегания, что определяет специфику их освоения и переработки. Таким образом, тектоническая активность региона оказывает существенное влияние на распределение угленосных толщ и условия их разработки.

Гидрогеологические, инженерно-геологические и горнотехнические условия участка месторождения. Для изучения гидрогеологического и инженерно-геологических условий месторождения наряду с другими видами геологоразведочных работ по изучению месторождения геологоразведочной экспедицией Управления геологии была проведена комплексная гидрогеологическая и инженерно-геологическая съемка.

Результатами проведенных ранее работ по геологической съёмке масштаба 1:50000 установлено, что гидрогеологические условия обусловлены геоморфологическими, гидрографическими и геолого-литологическими факторами, проявившимися на площади участка и месторождения.

Геоморфологические факторы проявлены на площади участка в наличии расчлененного рельефа, образованный в результате деятельности гидрографической сети. Территория участка прорезана реками и более мелкими временными водотоками, которые образуют водораздельные, склоновые,

долинные и другие формы рельефа, способствующие образованию различных типов вод и гидрогеологических условий площади.

Питание рек осуществляется за счёт таяния снежников, инфильтрации атмосферных осадков и грунтовых вод. Реки в весенний паводковый период бурные и труднопроходимые. Кроме того, имеется ряд родников, питающихся за счет инфильтрации поверхностных источников воды, что свидетельствует о развитии грунтовых вод на площади. Также имеются заболоченные участки, приуроченные к пониженным формам рельефа изученной площади.

В соответствии с геолого-литологическим строением на площади месторождения (участка) выделяются несколько водоносных комплексов грунтовых вод, а именно:

Водоносный комплекс четвертичных отложений. Мощность и площадное развитие четвертичных толщ, в силу сильной расчлененности рельефа, ограничены, и грунтовые воды в них развиты, в основном, по долинам рек и ручьев. Питание осуществляется за счет инфильтрации поверхностных вод. В первом случае формируются пресные и ультрапресные воды со степенью минерализации 0.2-0.4 г/л. Во втором случае – степень минерализации и химический тип вод зависят от химических особенностей коренных пород.

Водоносный комплекс юрских отложений. По генетическому типу воды данного комплекса подразделяются на локально-трещинные, трещинно-пластовые, трещинно-порово-пластовые. Водоносный комплекс нижних и среднеюрских отложений занимает практически всю площадь месторождения, Воды комплекса разгружаются в ряд мелких временных водостоков и родников, также образуют заболоченные участки, приуроченные к пониженным формам рельефа. При проходке горных выработок наблюдался значительный приток воды до 6-8 л/мин в шурфах и штольни. Родники приурочены к трещинно-жильным зонам. Непосредственное выкачивание вод происходит из покровно-супсечано-обломочных делювиальных отложений. Воды комплекса по химическому составу хлоридно-гидрокарбонатно-кальциево-натриевые с минерализацией 0.8-1.0 г/л в редких случаях до 15 г/л. Содержание

микрокомпонентов не превышает ПДК, углекислой агрессивностью воды не обладают. Дебит родников меняется от 0.5 до 12 л/сек.

Водоносный комплекс триасовых отложений. Водоносный комплекс триасовых отложений характеризуется степенью минерализации грунтовых вод в пределах 0.9-1 г/л. Основной химический тип – хлоридно-гидрокарбонатно-кальциевый. Дебит родников, в зависимости от их генетического типа, варьирует в пределах 0.5-10 л/сек.

Инженерно-геологические условия месторождения характеризуется развитием на его площади угленосной ниже-среднеюрской, терригенно-нижнемеловой орогенной формаций континентальных моласс и четвертичными образованиями. Кровлей и почвой угольного пласта являются песчаники, алевролиты, аргиллиты и углистые аргиллиты, для которых характерна слоистость и чешуйчатость. Породы разбиты трещинами различных направлений. По слоистости развиты зеркала скольжения. Устойчивость пород низкая. По ГОСТу 25100-82 [2] данные породы относятся к классу грунтов без жестких связей, к группе обломочных, нецементированных, к подгруппам пылеватых и глинистых, к типу супесчано-суглинистых со щебнем и дресвой в объеме до 25%. По трудности разработки породы вскрыши относятся по СНИП: суглинки, аргиллиты ко II категории, песчаники, алевролиты – к III категории, а сами угли – ко II категории.

Разведанный участок расположен в горной местности и характеризуется расчлененным рельефом. В этой связи возможны проявления некоторых видов экзогенных геологических процессов - оползней, осыпно-обвальных и селевых.

Техногенный комплекс (Q_{IVt}) – образован отвалами эксплуатируемого карьера. Отвалы сложены суглинисто-супесчанистыми материалами с дресвой и щебнем до 10-15%, и с включениями единичных глыб.

Оползнево-стратиграфо-генетический комплекс голоценовый (Q_{IVdp}) – широко распространен на площади месторождения и представлен солифлюкционные грунтами с включениями дресвы и щебня, до 10-20%, либо суглинками – пылеватыми, однородными, лессовидными.

Угленосная формация занимает почти всю площадь месторождения и представлена одним стратиграфо-литологическим комплексом (J_{1-2}), в котором выделяются следующие типы пород:

- песчаники серые, светло-серые до белых с зеленоватым оттенком, тонкозернистые, ожелезненные с поверхности выветрелые и трещиноватые;
- алевролиты серые и бурые, глинистые, листовато-слоистые, обохренные, и ожелезненные, с поверхности выветрелые, разрушенные;
- аргиллиты (сланцы) углистые, темно-серые до чёрных, микрослоистые, ожелезненные по плоскостям слоистости, выветренные и разрушенные с поверхности до состояния песка.

Прочностные свойства аргиллитов и углей принимаются по справочным данным:

- предел прочности при одноосном сжатии – $20 \cdot 10^5$ Па,
- предел прочности при растяжении – $2 \cdot 10^5$ Па,
- сцепление – $3 \cdot 10^5$ Па.
- угол внутреннего трения – 29° .

Согласно ГОСТу 25100 [3] песчаники и алевролиты, нижнесреднеюрского комплекса относятся к породам низкой прочности, аргиллиты и угли к породам весьма низкой прочности. По степени размягчаемости породы размягчаемые. Покровные отложения, представленные щебнисто-суглинистыми и лессовидными грунтами, развиты на большей части поверхности месторождения, мощность их колеблется от 0.5-2.0 (крутые участки) до 20 м и более (на пологих участках и террасовидных площадках).

На месторождении добычные работы еще были начаты в тридцатых годах карьерным способом для местных нужд. Разработка была сосредоточена, в основном, в верхнем пласте угля. Рельеф участка добычи благоприятный. Мощность покровных отложений, перекрывающих пласты небольшая, особенно, на перевальной части. Очень малая зона выветривания в таких частях

способствует разработке открытым способом, уступами высотой до 1.5 м. На остальной части месторождения, где наносы значительные, эксплуатация возможна только штольневым способом. В силу этого обстоятельства разработка месторождения (участка) предполагается до 20м глубины открытым способом, а глубокие горизонты – подземным способом. Вмещающие породы являются силикоз опасными, угольная пыль является взрывчатой (I группа опасности к самовозгоранию). Будущий карьер ожидается с углами наклона от 35 до 50°. Месторождение характеризуется тяжёлыми транспортными условиями. В глубокие выработки предполагается приток воды.

Литологический и петрографический состав углей. Литологический состав каменноугольных отложений Фан-Ягнобского месторождения отличается значительным разнообразием и отражает сложные условия осадконакопления в тектонически активной зоне. На месторождении представлены угли различной степени углефикации — от бурых до высококачественных каменных углей. Угольные пласты характеризуются значительной вариабельностью мощности, что позволяет выделять экономически наиболее перспективные объекты для промышленной разработки [8].

Залегание пластов под углами 30–44° усложняет горнотехнические условия добычи и требует применения специальных технологических решений (рис. 1).

Химико-технологические и экологические характеристики углей. Фан-Ягнобское месторождение относится к каменноугольному типу с различной степенью углефикации — от среднеугольных до высокоуглеродистых сортов. Угли характеризуются высоким содержанием углерода (C), что обеспечивает их высокую теплотворную способность. Содержание летучих веществ (Vdaf) находится в среднем диапазоне, определяя удовлетворительные показатели воспламеняемости и скорости горения. Зольность (Ad), как правило, умеренная и варьирует в зависимости от конкретного пласта, что имеет значение при выборе схем обогащения и сжигания [5]. Содержание серы (S) низкое или умеренное, что снижает риск коррозионных процессов и негативного воздействия на окружающую среду.

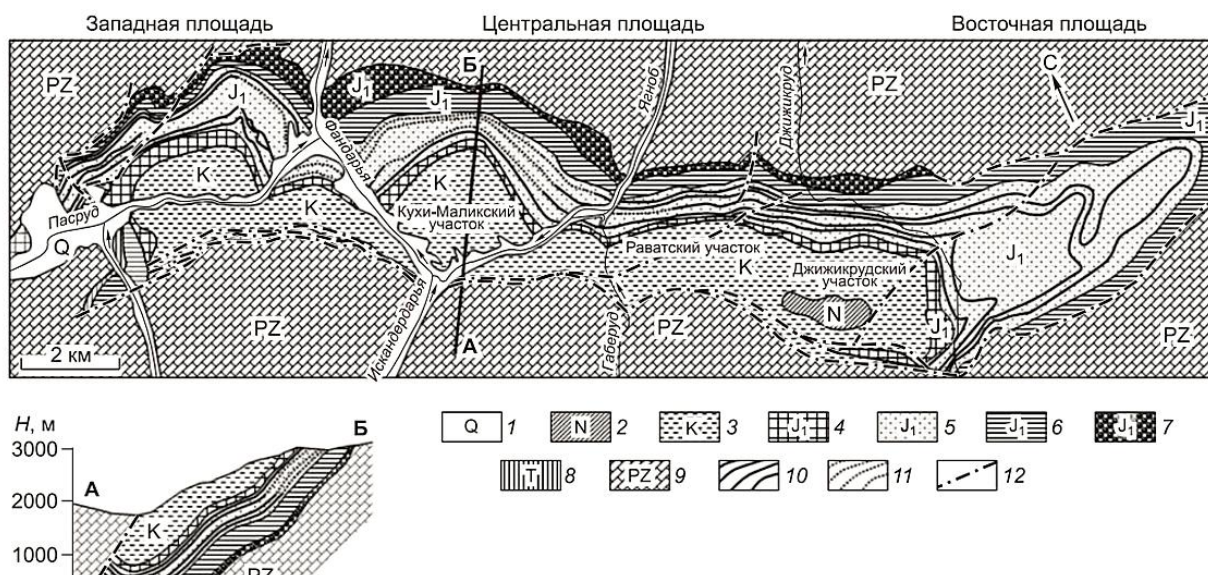


Рисунок 1. Схематическая геологическая карта Фан-Ягнобского каменноугольного месторождения по данным (Геология...1968).

1 – четвертичные отложения; 2 – неоген; 3 – мел, 4-7 – юра: 4 – верхняя непродуктивная свита; 5 – угленосная свита; 6 – нижняя непродуктивная свита; 7 – базальная свита; 8 – триас; 9 – палеозой; 10 – угольные пласты; 11 выгоревшие угольные пласты; линии нарушений

Благоприятные физико-механические свойства угля — твёрдость и плотность — позволяют использовать его в металлургических процессах, включая коксование. Низкое содержание серы уменьшает выбросы диоксида серы (SO_2), одного из основных факторов кислотных дождей. Умеренная зольность снижает нагрузку на системы утилизации зольных отходов и уменьшает экологические риски.

Разработка месторождения в сложных горно-геологических условиях требует строгого соблюдения природоохранных мероприятий, включая предотвращение эрозии почв, защиту водных объектов и рекультивацию нарушенных земель. Высокие качественные характеристики углей создают предпосылки для внедрения современных технологий очистки и экологически безопасного сжигания.

Геохимические особенности и металлоносность углей. Прогностико-поисковые критерии выявления угольных месторождений включают комплекс геолого-геофизических и геохимических признаков, в том числе структурно-тектонические элементы (надвиги, сбросы, поднятия), способствующие формированию угленосных бассейнов.

Содержание углерода в органической массе угля (C_{daf}) обычно составляет 75–85%, что обеспечивает высокую калорийность и энергетическую ценность углей. Органическое вещество, сохраняющееся в угленосных и сопутствующих породах (глинистых и углистых сланцах, алевролитах), представлено продуктами разложения растительного материала и процессами углефикации. В самих углях содержание органического углерода может достигать 50–70% и более [1].

Первые данные о микроэлементном составе углей Фан-Ягнобского месторождения были получены Н.С. Огневым в 1955–1958 гг. Полуколичественный спектральный анализ 670 проб показал, что содержание германия в большинстве образцов не превышает 10–30 г/т золы, а в отдельных пробах Западной площади достигает 60–100 г/т.

С 1980 года исследования металлоносности углей проводились М.М. Альтгаузенем и И.Г. Шаровой. Анализ 730 проб угля и вмещающих пород западной площади позволил оценить металлоносность пяти угольных пластов (№ 12, 10, 9, 8 и 6), а также определить предварительные уровни концентраций токсичных элементов.

Угли Западной площади характеризуются повышенным содержанием экологически опасных элементов — фтора, мышьяка, ртути и ванадия, при более локальных аномалиях свинца, бериллия и марганца.

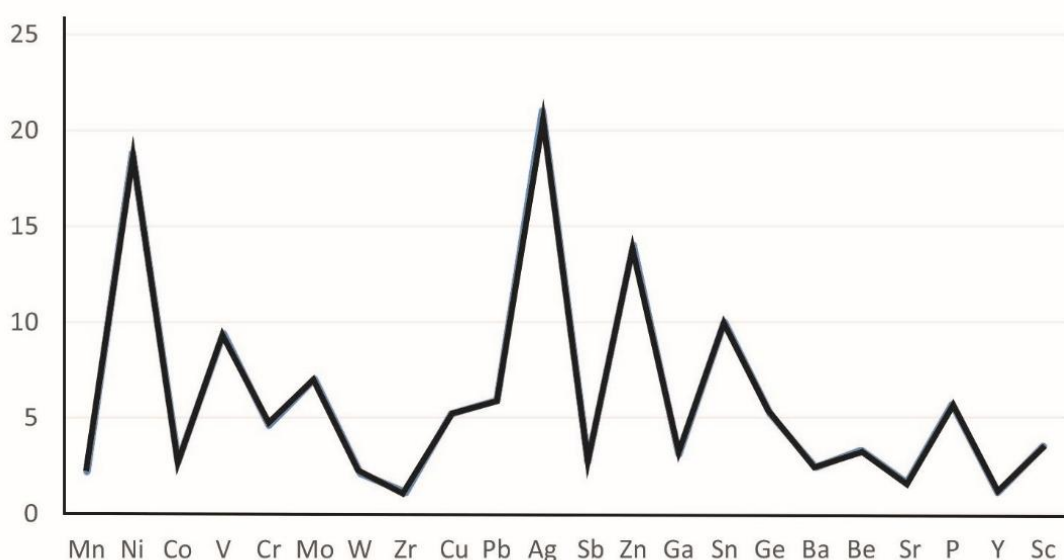
Металлоносность углей Восточной площади изучена по материалам И.Т. Шаровой и данным Джижикрутской ГРП (1986–1990 гг.). Анализ показал, что угольные пласты в целом обладают сходной геохимической специализацией. Большинство пластов специализированы (КК > 5) на ванадий, молибден, медь, серебро, сурьму, олово и фосфор, а также (КК > 2) на хром, свинец, цинк, галлий,

бериллий, вольфрам, германий, барий, стронций и скандий. Минимальные коэффициенты концентрации ($KK < 2$) характерны для марганца, никеля, кобальта, мышьяка и иттрия.

На примере угольных пластов восточной площади (9 и 6) изучена закономерность распределения содержаний микроэлементов в углях с различной зольностью (рис. 2). Установлено, что элементы, на которые специализированы угли ($KK \geq 3-53$), преимущественно концентрируются в высокозольных пачках угольных пластов ($Ad > 40\%$). К ним относятся титан, германий, медь, серебро, олово, сурьма, ванадий, свинец, хром, цинк и бериллий.

Как показывают полученные данные, значения коэффициентов концентрации малых элементов для восточной и западной площадей существенно различаются и варьируют в широком диапазоне — от 0.8 до 21.0. Наиболее выраженные колебания и сравнительно высокие значения коэффициента концентрации характерны для угленосных образований Восточной площади.

(a)



(б)

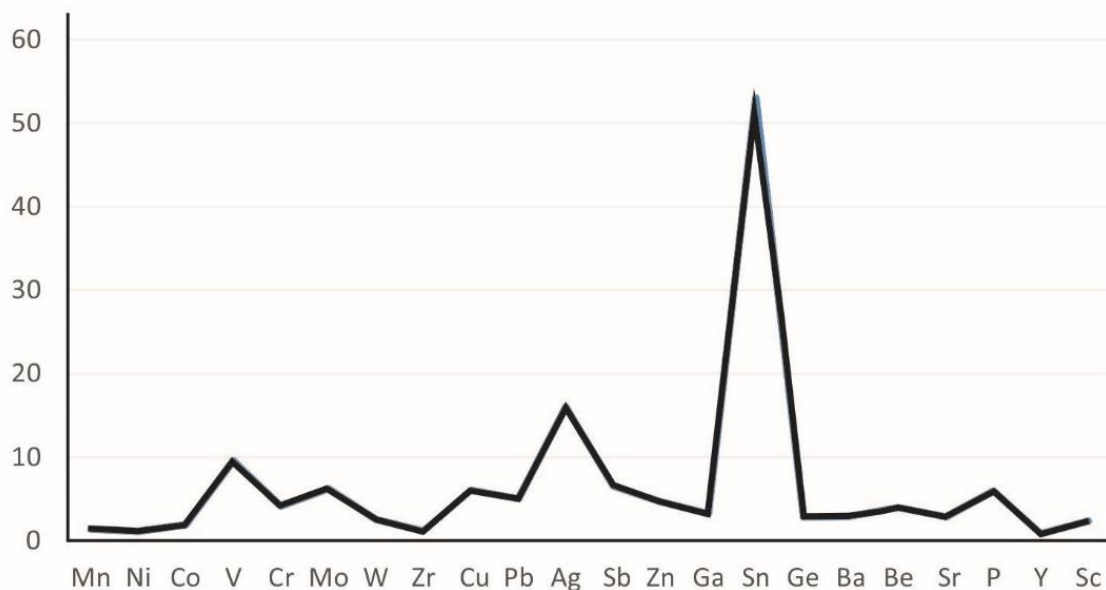


Рисунок 2. Вариационные диаграммы коэффициента концентрации малых элементов в углях месторождения Фан-Ягноб:

а — в целом по углям западной площади;

б — в целом по углям восточной площади

Здесь максимальные значения отмечаются для Ni, Ag, Zn, Sn и Ge, достигая 20 и более. В отличие от этого, для западной площади коэффициенты концентрации в целом отличаются большей стабильностью; аномально высокие значения зафиксированы лишь для одного элемента — олова, коэффициент концентрации которого превышает 50.

Выявленные различия в коэффициентах концентрации малых элементов в углях восточной и западной площадей, по-видимому, обусловлены спецификой их геологического строения, особенностями рудогенеза и характером угленосности. Данное предположение подтверждается анализом кривых вариации содержания малых элементов в зависимости от зольности углей Восточной площади каменноугольного месторождения Фан-Ягноб (таблица). В золах этих углей фиксируются повышенные концентрации цинка, бария,

фосфора, ванадия, хрома, никеля и марганца, изменяющиеся в интервале от 0.15 до 760 г/т.

Таблица. Содержание микроэлементов в углях различной зольности Восточной площади месторождения Фан-Ягноб, г/т

Пласт	13	12	9	8
Кол-во проб	2	3	9	2
Зольность A ^b (%)	20	30	10	10
Ti	н/об	9.11	99	340
Mo	1.7	3	2	0.8
W	0.6	6	н/об	н/об
Zr	н/об	11	9	10
Cu	24	14	8	12
Ag	0.15	3	0.04	0,2
Zn	380	37	9	34
Sb	0.3	0.3	0.6	0.4
Ge	0.3	0.3	0.06	0.4
Ga	1.9	н/об	0.8	1.2
Ba	104	н/огр.	64	116
Sr	38	72	10	19
P	760	280	106	485
Y	4.2	2	4	02
Sn	4.2	н/об	08	н/об
Hg	н/об	н/об	н/об	н/об
Be	2.1	7	0.4	0.6
V	47	352	15	24
Co	12	12	4	3
Ni	24	64	17	15
Pb	22	24	4	9
Cr	11	777	21	24
Mn	76	557	52	31
н/об		12	2	н/об

Выводы

Экономическая оценка Фан-Ягнобского каменноугольного месторождения (Республика Таджикистан) базируется на значительных запасах угля, его высоком промышленном потенциале и необходимости инвестиций, направленных на модернизацию инфраструктуры и расширение добычи.

Угли месторождения характеризуются высоким качеством и представлены коксующимися, газowo-жирными и газовыми разновидностями, что определяет их востребованность в металлургической и энергетической отраслях. Промышленная добыча на шахте «Фан-Ягноб» ведётся в стабильном режиме и сопровождается перевыполнением плановых показателей, что свидетельствует об эффективности функционирования предприятия.

В то же время для дальнейшего повышения эффективности добычи и переработки угля требуется модернизация оборудования и производственной инфраструктуры. Реализация данных мероприятий будет способствовать созданию новых рабочих мест и развитию смежных отраслей экономики. С учётом высокого качества угля и устойчивого спроса на международных рынках Фан-Ягнобское месторождение обладает значительным экспортным потенциалом, реализация которого может внести существенный вклад в укрепление экономики Республики Таджикистан.

Литература

1. Брик М.И. Юрские отложения Центрального Таджикистана // *Геология СССР*. Т. 24: Таджикская ССР. Ч. 1. – М.: Госгеолиздат, 1959. – С. 56-57.
2. ГОСТ 25100–82. Грунты. Классификация. – М.: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1982. – 41 с.
3. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. – Введ. 2021–01–0// – Москва: Стандартинформ, 2020. – 46 с.
4. Минерально-сырьевые ресурсы Таджикистана// – Душанбе: Изд-во «Дониш», 1983. – 237 с.

5. Фозилов Дж.Н., Алидодов Б.А., Джалолова М.К. Геолого-экономическая оценка и перспективы использования каменноугольного месторождения Фан-Ягноб // Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии, гидрологии и разработки месторождений полезных ископаемых Таджикистана: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Душанбе, 2022. – С. 93-101.
6. Фозилов Дж.Н., Алидодов Б.А., Джабаров С.А. Геолого-геохимические факторы металлоносности углей каменноугольного месторождения Фон-Ягноб // Наука и инновация. Серия: геологические и технические науки. – 2019. – № 3. – С. 143-147.
7. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Неорганическая геохимия угля: аспекты теории// – Сыктывкар: УрО РАН, 2006. – 538 с.
8. Юсупов С.К., Омонов Х.А., Ёдгаров Н., Юсупов Ф.М., Байматова Г.А. Веталлоносность угольных бассейнов и месторождений Республики Узбекистан // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. Юсупов С.К. [и др.]. 2022. 12(102). – С. 83-89. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/14662> (дата обращения: 03.09.2026).

МЕЪЁРҲОИ ПЕШГЌИШАВАНДА ВА ҶУСТУҶЌИИ МУАЙЯНСОЗИИ АНГИШТСАНГҲОИ МЕТАЛДОР ДАР КОНИ АНГИШТИ САНГИИ ФОН-ЯГНОБ

Фозилов Ҷ.¹, Саидов М.С.²

*Институти геология, сохтмони ба заминҷунби тобовар ва сейсмологияи Академияи
миллии илмҳои Тоҷикистон¹*

Филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе²

Аннотатсия. Дар шароити афзоиши талабот ба истифодаи комплекси захираҳои табиӣ, омӯзиши ангиштҳои металдори сангӣ аҳаммияти калон дорад. Дар мақола меъёрҳои пешгӯӣ-ҷустуҷӯи ва муайянсозии ангиштҳои бо металлҳои нодири заминӣ ва металлҳои қиматбаҳо ганишуда дар мисоли кони Фан–Ягноб (Тоҷикистон) баррасӣ мегарданд. Нишон дода шудааст, ки ангиштҳои табиӣ дар як қатор шароити геологӣ генетикӣ метавонанд ҳамчун манбаи элементҳои арзишманд, аз ҷумла германий, литий, скандий ва дигар элементҳо хизмат

кунанд, ки консентратсияи онҳо ба равандҳои сорбсионӣ дар марҳилаи ташаккули торф вобаста мебошад. Таҳлили хусусиятҳои геологӣ сохторӣ ва стратиграфии кон анҷом дода шуда, параметрҳои литологӣ стратиграфии таҳшинҳои ангиитдор ва қабатҳои ангиит дақиқ карда шудаанд. Дар асоси маълумоти бадастомада зарурати гузаронидани тадқиқоти муфасссали геохимиявӣ бо мақсади ошкор намудани қитъаҳои умедбахше, ки бо консентратсияи баландтари ҷузъҳои арзишманд тавсиф меёбанд, асоснок карда мешавад. Натиҷаҳои ҳосилишуда аҳаммияти кони Фан-Ягнобро ҳамчун манбаи эҳтимолии ашӯи хоми маъдани маҷмӯӣ, ки барои коркарди саноатӣ ҷолиб мебошад, таъкид менамоянд.

Калидвожаҳо: ангиитсанг, металҳо, таҳшинҳо, меъёрҳо, ашӯи хом, стратиграфия, геология, қабат, шароит, торф.

FORECASTING AND PROSPECTING CRITERIA FOR IDENTIFYING METAL-BEARING COALS OF THE FAN-YAGNOB COAL DEPOSIT

J. Fozilov¹, M.S. Saidov²

Institute of Geology, Earthquake-Resistant Construction and Seismology

National Academy of Sciences of Tajikistan¹

Lomonosov Moscow State University in Dushanbe²

Annotation. In the context of the growing demand for the integrated use of natural resources, the study of coal metal-bearing capacity is becoming increasingly relevant. This paper examines forecasting and prospecting criteria for identifying coals enriched with rare earth and precious metals, using the Fan-Yagnob coal deposit (Tajikistan) as a case study. It is shown that natural coals, under certain geological and genetic conditions, can serve as a source of valuable elements, including germanium, lithium, scandium, and others, whose accumulation is associated with sorption processes at the peat formation stage. An analysis of the geological-structural and stratigraphic features of the deposit was carried out, and the lithological-stratigraphic parameters of coal-bearing strata and coal seams were refined. Based on the obtained data, the necessity of conducting detailed geochemical studies is substantiated in order to identify promising areas characterized by elevated concentrations of valuable components. The results obtained emphasize the significance of the Fan-Yagnob deposit as a potential source of complex mineral raw materials of interest for industrial processing.

Keywords: coal, rare earth elements, geochemistry, coal-bearing strata, Fan-Yagnob, Tajikistan, forecasting and prospecting criteria, complex raw materials.

Сведения об авторах: **Фозилов Дживоншо Нурович** – к.г.-м.н., старший научный сотрудник Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана. **Адрес:** 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни 267. **Тел.:** (+992 97) 791 82 82. **E-mail:** fozilov.tj@mail.ru.

Саидов Мирзо Сибгатуллоевич – д.г.-м.н., профессор, профессор кафедры «Науки о Земле» филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. **Адрес:** 734003, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Бохтар, 35/1. **Тел.:** (992 93) 868 97 10. **E-mail:** saidov-mirzo@mail.ru.

Маълумот дар бораи муаллифон: **Фозилов Чивоншо Нурович** – н.и.г.-м., ходими калони илмии Институти геология, сохтмони ба заминчунби тобовар ва сейсмологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон. **Суроға:** 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Айни 267. **Тел.:** (+992 97) 791 82 82. **E-mail:** fozilov.tj@mail.ru.

Саидов Мирзо Сибгатуллоевич – д.и.г.-м., профессор, профессори кафедраи илмҳо оид ба Замини филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе. **Суроға:** 734003, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, к. Бохтар, 35/1. **Тел.:** (992 93) 868 97 10. **E-mail:** saidov_mirzo@mail.ru.

Information about the author: **Fozilov Jivonsho Nurovich** – Cand. Sc. in Geol. & Min., Senior Researcher at the Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan. **Address:** Ayni Str. 267, Dushanbe, Tajikistan, 734063. **Phone:** (+992 97) 791 82 82. **E-mail:** fozilov.tj@mail.ru.

Saidov Mirzo Sibgatulloevich – DSc in Geol. & Min., Professor of the Department of Earth Sciences, Lomonosov Moscow State University in Dushanbe. **Address:** Bokhtar Str. 35/1, Dushanbe, Tajikistan, 734003. **Phone:** (+992 93) 868 97 10. **E-mail:** saidov-mirzo@mail.ru.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В научном журнале «Вестник филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе» печатаются статьи, содержащие результаты научных исследований по естественным, гуманитарным и экономическим наукам. Направляя статью в редколлегию, автору необходимо соблюдать следующие правила: размер статьи не должен превышать 10 страниц компьютерного текста, включая текст, таблицы, библиографию, рисунки и тексты аннотаций на таджикском, русском и английском языках; статья должна быть подготовлена в системе Microsoft Word, при этом одновременно с распечаткой статьи в 2-х экземплярах сдаются также соответствующие файлы (для каждой статьи на отдельном диске); рукопись должна быть отпечатана на компьютере (шрифт Times New Roman 14, формат А4, интервал 1.5, поля: верхнее – 2.0 см, нижнее – 2.0 см, левое – 2.0 см, правое – 2.0 см), отступ 0.75. Все листы статьи должны быть пронумерованы; текст статьи должен быть изложен кратко, тщательно отредактирован и подписан всеми авторами с указанием их фамилий, имён и отчеств с номерами телефонов; каждый экземпляр должен содержать текст статьи, список литературы; название статьи, название вуза (организации), аннотация и ключевые слова представляются на русском, таджикском и английском языках; после заголовка статьи приводится название учреждения (-ий), в котором (-ых) выполнена данная работа; в верхнем правом углу первой страницы рукописи указывается раздел науки, которому соответствует статья, строкой ниже в левом углу страницы указывается индекс статьи по универсальной десятичной классификации (УДК). Ниже приводится название статьи, затем указывается название организации, в центре следующей строки – инициалы и фамилия автора (-ов); ниже – краткая аннотация (на языке, на котором написана статья) с указанием конкретных результатов работы и вытекающих из них выводов, а также ключевые слова, наиболее полно отражающие область исследования и полученные в работе результаты (до 10-12 слов) через тире и адрес для корреспонденции (почтовый и электронный). Далее

через строку следует основной текст. Сразу после текста статьи приводится список литературы (не более 15 названий) под заголовком «Литература» в порядке упоминания, ссылки на цитируемую литературу по тексту даются в квадратных скобках, например [1].

Список литературы оформляется следующим образом: для книг – фамилия и инициалы автора (-ов), полное название книги, место издания, издательство, год издания, том или выпуск, общее количество страниц. Для периодических изданий – фамилия и инициалы автора (-ов), название статьи, год издания, том, номер, первая и последняя страницы статьи.

В целом, оформление статьи должно соответствовать предъявляемым установленным нормам:

- формулы и символы должны быть напечатаны на компьютере в одном стиле;
- написание математических формул в виде рисунков не допускается;
- следует избегать громоздких обозначений;
- занумерованные формулы пишутся с красной строки, номер формулы в круглых скобках ставится у правого края;
- нумеруются лишь те формулы, на которые имеются ссылки;
- сокращения должны быть расшифрованы, за исключением общепринятых;
- в десятичных дробях после целой части числа ставится точка;
- при упоминании в тексте иностранных фамилий в скобках необходимо давать их оригинальное написание;
- первое упоминание в статье названия вида животного или растения приводится по-русски и по латыни;
- в тексте необходимо дать ссылки на все приводимые таблицы, рисунки и фотографии;
- научные статьи, представленные в редакцию журнала, должны иметь направление учреждения, в котором выполнялась данная работа и экспертное заключение о возможности опубликования;

- при выполнении работы в нескольких учреждениях представляются направления из каждого учреждения;
- к статье должна быть приложена заверенная рецензия специалиста.

Редколлегия оставляет за собой право производить сокращения и редакционные изменения статьи. Статьи, не отвечающие настоящим правилам, редколлегией не принимаются.

ТРЕБОВАНИЯ И ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

(Приложение 2 к приказу председателя Высшей аттестационной комиссии при Президенте Республики Таджикистан от 27 декабря 2024 года, № 493

(Инструкция о порядке оформления диссертации, автореферата диссертации и других научных материалов))

Научная статья – это логически завершённое произведение, посвящённое конкретному вопросу из круга проблем, исследуемых соискателем учёной степени в диссертации. Научная статья раскрывает наиболее значимые результаты, полученные соискателем учёной степени, которые требуют более широкого изложения и обоснования. Обычно научная статья подаётся в редакцию рецензируемого научного журнала для публикации в одной из двух форм:

1. теоретическая научная статья;
2. эмпирическая научная статья.

Теоретическая научная статья, предназначенная для публикации в рецензируемых научных журналах, должна иметь следующую структуру:

Введение — теоретической научной статьи должно включать в себя следующие элементы:

Начало. В этой части подчеркивается важность изучения выбранной темы. Объём – от 1-2 абзацев до 1-2 страниц, в зависимости от степени сложности исследуемой проблемы. Краткий обзор научной проработки темы и обоснование необходимости её дальнейшего изучения. Следует указать научные труды, в

которых рассматривались различные аспекты данной проблемы. Эту часть можно также охарактеризовать как теоретические основы исследования. Здесь упоминаются методология, концепции и теории, на которые опирается автор статьи.

Цель исследования. Наряду с формулировкой цели исследования, в данной части также может быть представлена гипотеза исследования. В отдельных случаях, для большей структурированности статьи, формулируются и исследовательские вопросы. Необходимость изучения темы становится обоснованной в том случае, если в существующих научных работах по данной теме выявляется научный пробел.

Методы исследования. В этой части введения не следует перечислять общенаучные методы. Вместо этого автор может описать и охарактеризовать собственный специфический метод, если он применялся в исследовании (*рекомендуемый элемент*).

Основная часть (может включать в себя подзаголовки в зависимости от составных аспектов темы). Основная часть теоретической научной статьи должна включать следующие элементы: Анализ и описание научной литературы. Описание литературы или отдельных аспектов проблемы должно быть изложено в логической хронологической последовательности. При этом целесообразно указать критерии отбора источников, а также основных авторов и, при необходимости, описать методику подбора литературы. Важно, чтобы в этой части статьи проводился глубокий теоретический анализ с выявлением существующих подходов, их сопоставлением и критическим осмыслением. Это создаёт основу для дальнейших рассуждений автора и выработки собственных выводов.

Обсуждение. В данной части статьи необходимо проанализировать и интерпретировать результаты исследования. Следует ясно указать, была ли достигнута цель исследования, подтвердилась ли гипотеза, или же она оказалась неверной.

Ограничения исследования (*рекомендуемый элемент*). Здесь указываются

трудности и ограничения, с которыми столкнулся автор в ходе работы. Также поясняется, почему некоторые аспекты не были охвачены в исследовании.

Заключение. Объём заключения составляет от 1 до 2 страниц. В нём кратко излагаются основные результаты исследования и подчёркивается их значение для развития науки. Автор может также указать возможные направления дальнейшего исследования по теме: какие аспекты ещё требуют изучения, какие вопросы остались открытыми. Из заключения читатель должен ясно понять, достигнута ли цель исследования и подтвердилась ли гипотеза – это обязательные элементы данной части.

Список использованной литературы.

Эмпирическая научная статья, предназначенная для публикации в рецензируемом научном журнале, должна иметь следующую структуру:

Введение. Введение в эмпирическую научную статью должно включать следующие элементы: начало введения – общая характеристика важности темы, актуальности её исследования. Эта часть введения, в зависимости от сложности темы, должна быть разработана от 2-3 абзацев до 2-3 страниц. Здесь обосновывается необходимость изучения темы, а также требуется описание научной литературы (**обязательный элемент**). Описание общего отражения проблемы в науке, то есть упоминание авторов, проводивших исследования по данной теме. Также должно быть упомянуто о концепциях, теоретических подходах и методах других авторов (**обязательный элемент**).

Цель исследования. Цель исследования должна быть связана с актуальностью темы и отражать восполнение пробела в научном знании. Здесь также может быть изложена гипотеза исследования. После цели исследования также можно представить исследовательские вопросы (**обязательный элемент**).

Методы и методология. Эта часть статьи должна содержать следующие элементы: Методы. Здесь не упоминаются общенаучные методы. Разрешается использование специфических научных методов. Однако в большинстве случаев приводится методика самого автора, которая необходима для понимания его

исследования (методы, этапы исследования, критерии исследования и т.д.) (**обязательный элемент**).

Материалы. Наличие этого раздела зависит от метода исследования. Если в процессе исследования использовались конкретные материалы, то их перечисляют и описывают. Здесь следует указать структуру материалов и критерии их выбора, например, анкеты, различные источники и т.д.

Участники. Наличие этого раздела также зависит от метода исследования. Например, если проводились опросы и анкеты (социологическое исследование), то в этом разделе указываются участники исследования. Например, можно перечислить участников по таким признакам, как возраст, пол, социальный статус и так далее.

Процедура проведения исследования. В этом разделе статьи показывается, как с использованием указанных методов и материалов было проведено исследование. Процедура должна быть описана так, чтобы другие исследователи могли повторить исследование (**обязательный элемент**).

Результаты исследования. В этом разделе основные результаты исследования должны быть представлены без дополнительных комментариев и объяснений. Все интерпретации и объяснения результатов должны быть вынесены в раздел «Обсуждение». В данном разделе также уместно представить таблицы и графики. Результаты исследования можно также разбить на подгруппы с указанием подтем (**обязательный элемент**).

Обсуждение результатов исследования.

Этот раздел эмпирической научной статьи должен включать следующие элементы:

Обсуждение результатов исследования – здесь результаты должны быть интерпретированы и объяснены. Через анализ результатов исследования показывается, была ли достигнута цель исследования, насколько гипотеза исследования оказалась правильной, а также анализируется, как полученные результаты соотносятся с исследованиями других учёных (**обязательный элемент**).

Ограничения исследования. В этом разделе статьи указываются проблемы и недостатки, с которыми столкнулся автор в процессе исследования. Например, это могут быть отсутствие материалов, недостаточный срок для проведения исследования и другие ограничения (**рекомендуемый элемент**).

Вклад автора в изучение темы. Здесь показывается, как вклад автора или проведённое им исследование повлияло на развитие науки. Объём этого раздела может быть от 1-2 предложений до 1-2 абзацев. В нём кратко излагаются результаты исследования как вклад автора в изучение проблемы. Этот раздел можно также оформить в контексте научной новизны исследования (**обязательный элемент**).

Заключение составляет от 1 до 2 страниц. В этом разделе кратко излагаются результаты исследования и подчёркивается их значение для развития науки. Автор может также указать направления для будущих исследований: какие дополнительные работы могут быть выполнены для дальнейшего изучения проблемы. Из заключения читатель должен чётко понять, была ли достигнута цель исследования, а также подтвердилась ли гипотеза (**обязательный элемент**).

Список использованной литературы.

Для научных статей как теоретического, так и эмпирического типов, помимо основного текста статьи на трёх языках (таджикском, русском и английском), разрабатываются следующие данные:

Как для теоретических, так и для эмпирических научных статей, помимо основного текста статьи на трёх языках (таджикском, русском и английском), подготавливаются следующие сведения:

Название статьи. Название статьи должно соответствовать содержанию текста.

Аффилиация (информация об авторе): Фамилия, имя, отчество автора; статус – соискатель кафедры или отдела (если является соискателем), докторант PhD кафедры или отдела (если является докторантом PhD), докторант кафедры или

отдела (если является традиционным докторантом); основное место работы; занимаемая должность (для тех, кто не является соискателем или докторантом); адрес места работы; контактный телефон; электронная почта.)

Аннотация (краткое содержание статьи). В конце статьи размещается аннотация, предназначенная для публикации и распространения информации о статье. Объём аннотации не должен превышать 150 слов. Аннотация состоит из заголовка, перечня ключевых слов и основного текста. В заголовке слова «**Аннотация**» указываются фамилия, имя, отчество автора и название статьи.

Ключевые слова (до 15 слов) приводятся строчно, через запятую, в алфавитном порядке.

Текст аннотации должен содержать:

- цель исследования,
- использованные методы и оборудование,
- полученные результаты и их новизну,
- рекомендации по применению и область их использования.

При изложении материала аннотации следует использовать научный стиль и стандартизированную терминологию. Следует избегать сложных грамматических конструкций и редких, непонятных обозначений. Аннотация подаётся на таджикском, русском и английском языках. Статья на таджикском, русском или английском языке должна быть набрана в программе MS Word (шрифт Times New Roman, таджикская раскладка, размер шрифта – 14, межстрочный интервал – 1.5), оформлена в двух печатных экземплярах на одной стороне листа формата А4 и предоставлена вместе с обязательной электронной версией в рецензируемые научные журналы. Поля должны быть стандартными, ссылки (цитаты) в тексте нумеруются в соответствии с принятым порядком цитирования, а список использованных источников приводится в конце статьи.

Иллюстративные материалы (фотографии, рисунки, схемы, диаграммы) должны быть чёткими и ясными, пронумерованы в тексте в порядке их упоминания. Диаграммы предоставляются как в виде изображений в основном тексте, так и отдельно в электронной версии в формате Microsoft Office Excel.

**ПОРЯДОК РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В ЖУРНАЛ
«ВЕСТНИК ФИЛИАЛА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА В ГОРОДЕ ДУШАНБЕ»**

Статьи, поступающие в редакцию, проходят предварительную экспертизу (проводится членами редколлегии – специалистами по соответствующей отрасли науки) и принимаются в установленном порядке. Требования к оформлению оригинала статей приводятся в каждом номере журнала. Все присланные в редакцию статьи должны быть оригинальными материалами. При упоминании работ других авторов необходимо соблюдать точность при цитировании и указании источника. Редакция не принимает статьи, готовящиеся к публикации или уже опубликованные в других изданиях.

Если рукопись принята, то редакция сообщает автору замечания по содержанию и оформлению статьи, которые необходимо устранить до передачи текста на рецензирование.

Затем статьи рецензируются в обязательном порядке членами редколлегии журнала или экспертами соответствующей специальности (кандидатами и докторами наук).

Рецензия должна содержать обоснованное перечисление качеств статьи, в том числе научную новизну проблемы, её актуальность, фактологическую и историческую ценность, точность цитирования, стиль изложения, использование современных источников, а также мотивированное перечисление её недостатков.

В заключении даётся общая оценка статьи и рекомендации для редколлегии – опубликовать статью, опубликовать её после доработки, направить на

дополнительную рецензию специалисту по определенной тематике или отклонить. Объем рецензии - не менее одной страницы текста. Статья, принятая к публикации, но нуждающаяся в доработке, направляется авторам с замечаниями рецензента и редактора. Авторы должны внести все необходимые исправления в окончательный вариант рукописи и вернуть в редакцию исправленный текст, а также его идентичный электронный вариант вместе с первоначальным вариантом рукописи. После доработки статья повторно рецензируется, и редколлегия принимает решение о её публикации. Статья считается принятой к публикации при наличии положительной рецензии и если её поддержали члены редколлегии.

Порядок и очередность публикации статьи определяется в зависимости от даты поступления её окончательного варианта. Рецензирование рукописи осуществляется конфиденциально. Разглашение конфиденциальных деталей рецензирования рукописи нарушает права автора. Рецензентам не разрешается снимать копии статей для своих нужд. Рецензенты, а также члены редколлегии не имеют права использовать в собственных интересах информацию, содержащуюся в рукописи, до её опубликования.

**Филиал Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе**
734003, г. Душанбе, ул. Бохтар, 35/1
Телефон: (+992 37) 221 99 41, 221 99 04.
E-mail: info@msu.tj, **сайт:** <https://vestnik-en.msu.tj>

**Филиали Донишгоҳи давлатии Москва
ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе**
734003, ш. Душанбе, к. Бохтар, 35/1
Телефон: (+992 37) 221 99 41, 221 99 04.
E-mail: info@msu.tj, **сомона:** <https://vestnik-en.msu.tj>

Lomonosov Moscow State University in Dushanbe
734003, Dushanbe, Bokhtar Str., 35/1
Phone: (+992 37) 221 99 41, 221 99 04.
E-mail: info@msu.tj, **website:** <https://vestnik-en.msu.tj>

Подписано в печать 21 августа 2026 года
Заказ № 135 Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии
филиала Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе
г. Душанбе, ул. Бохтар, 35/1