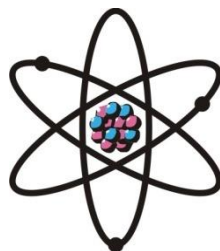


**ОТДЕЛЕНИЕ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ, ХИМИЧЕСКИХ,  
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Журнал основан  
в январе 1952 г.



№ 4 (193)  
2023 г.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Г.И.Кохирова** – главный редактор, член-корреспондент, доктор физико-математических наук; **С.А.Исхоков** – зам. главного редактора, член-корреспондент, доктор физико-математических наук, профессор; **С.Х.Абдулаева** – ответственный секретарь; **О.Амирзода** – доктор технических наук; **Х.М.Ахмедов** – академик, доктор химических наук; **Ш.Б.Бабаджанов** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **А.Бадалов** – член-корреспондент, доктор химических наук, профессор; **И.Н.Ганиев** – академик, доктор химических наук, профессор; **М.И.Илолов** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **С.Р.Мавлони** – кандидат геолого-минералогических наук; **У.М.Мирсаидов** – академик, доктор химических наук, профессор; **С.Х.Негматуллаев** – академик, доктор технических наук; **Д.Н.Низомов** – член-корреспондент, доктор технических наук, профессор; **С.О.Одинаев** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **Н.Р.Раджабов** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **Ф.Рахими** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **З.Х.Рахмонов** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **Т.Х.Салихов** – член-корреспондент, доктор физико-математических наук, профессор; **А.Р.Файзиев** – член-корреспондент, доктор геолого-минералогических наук, профессор; **Д.Х.Халиков** – академик, доктор химических наук, профессор.

**СОДЕРЖАНИЕ**

**МАТЕМАТИКА**

|   |    |
|---|----|
| <b>Д.К.Тухлиев, Ш.Наджмидин.</b> Наилучшее среднеквадратическое приближение в пространстве Бергмана $B_2$ .....   | 7  |
| <b>А.Н.Давлатов.</b> О критериях абсолютной $p$ -сходимости рядов в топологическом векторном пространстве .....   | 22 |
| <b>Р.Н.Одинаев, С.Х.Мавлонзода.</b> Математическое и компьютерное моделирование транспортной задачи и её применение в решении экономических задач Рогунской ГЭС ..... | 30 |

## **ИНФОРМАТИКА**

**М.Ф.Рахимов, Ф.С.Комилиён.** Анализ характеристик монолитных и микросервисных архитектур.....**44**

## **АСТРОНОМИЯ**

**Г.И.Кохирова, А.М.Буриев, С.Н.Сафаров, Ф.Дж.Рахматуллаева.** Результаты астрометрических наблюдений астероида 2011 XZ1 в астрономической обсерватории Санглох .....**55**

## **ФИЗИКА**

**Х.М.Абдуллаев, Э.Д.Шаимов, Р.Т.Кадыров, Ш.П.Исмаатов.** Релаксационные и деформационно-прочностные свойства двухкомпонентных жидкокристаллических сополиэфиров .....**63**

**У.Дж.Рахимова, М.Х.Эгамов, Х.Ш.Гаюров.** Изменения плоскости поляризации света в нематических жидких кристаллах на основе 4-пентил-4'-цианобифенила .....**73**

## **ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ**

**Э.Х.Пулатов, Д.Д.Тохилов, М.З.Турдалиев, Б.Г.Мавлонов, С.А.Умаров.** Тиазолидины и тиадиазины сопряженные с 1,4-бензодиоксаном.....**80**

## **НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ**

**А.С.Курбонов, К.И.Нематуллоев, С.М.Досаев, Н.А.Ашурзода, И.М.Рахимов, М.М.Тагоев.** Поиск и оценка возможности переработки железосодержащих руд месторождения Харангон .....**90**

**М.Т.Жумаев, Л.Солиев.** Изотерма фазообразования и растворимость системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при 50°C .....**95**

**А.Шарифов, У.М.Мирсаидов, А.Муродиён, М.А.Шодмонова, Х.А.Хусайнов.** Ресурсы и перспективы развития водородной энергетики в Таджикистане .....**103**

## **ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ**

**Н.Х.Шарафов, А.Муродиён, Ф.Шокир, А.Г.Сафаров, К.Ботуров, Ф.Р.Одинаев.** Исследование покрытия из местного сырья для электродов дуговой сварки.....**112**

## **ГЕОХИМИЯ**

**М.М.Мамадзафоев, Д.А.Давлатшоев.** О корреляционной связи между петрогенными элементами гранитоидов и лампрофиров интрузивных комплексов Кафандаринского рудного поля (Центральный Таджикистан).....**120**

## **ГЕОЛОГИЯ**

**Б.А.Аламов, Ш.А.Файзуллоев, Д.Ф.Байгенов, М.Р.Рахимбекова, У.А.Шарифов.** Степень восприимчивости склонов долины реки Обихингоу к возникновению оползней.....**136**

## **ЭНЕРГЕТИКА**

**М.Илолов, Ш.О.Кабиров, С.Расулов, Дж.Ш.Рахматов, Н.Ш.Юсуфбеков.** О потенциальных энергетических ресурсах солнечной энергии и производства зеленого водорода в районе озера Каракуль (Восточный Памир) .....**147**

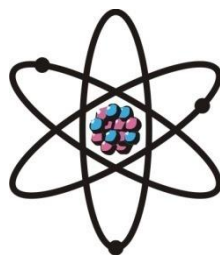
## **ПАМЯТИ УЧЕНОГО**

**Академик Хайдар Сафиев** – создатель нового научного направления по химической технологии в Таджикистане.....**157**

**Академик Саидмухаммад Одинаев (19.10.1942 – 03.08.2023)**.....**162**

**ШҮЪБАИ**  
**ИЛМҲОИ ФИЗИКАЮ МАТЕМАТИКА,**  
**ХИМИЯ, ГЕОЛОГИЯ ВА ТЕХНИКА**

Маҷалла аз моҳи  
январӣ соли 1952  
нашр мешавад



№ 4 (193)  
с. 2023

---

**ҲАЙАТИ ТАҲРИРИЯ:**

**Кохирова Г.И.** – сармуҳаррир, узви вобаста, доктори илмҳои физикаю математика; **С.А.Исҳоков** – муовини сармуҳаррир, узви вобаста, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **С.Ҳ.Абдулоева** – котиби масъул; **О.Амирзода** – доктори илмҳои техника; **Ҳ.М.Ахмедов** – академик, доктори илми химия; **А.Бадалов** – узви вобаста, доктори илми химия, профессор; **П.Б.Бобочонов** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **И.Н.Ғаниев** – академик, доктори илми химия, профессор; **М.И.Илолов** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **С.Р.Мавлонӣ** – номзади илмҳои геология ва минералогия; **Ҷ.М.Мирсаидов** – академик, доктори илми химия, профессор; **С.Х.Неъматуллоев** – академик, доктори илмҳои техника; **Д.Н.Низомов** – узви вобаста, доктори илмҳои техника, профессор; **С.О.Одинаев** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **Ф.Раҳимӣ** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **З.Ҳ.Раҳмонов** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **Н.Р.Рачабов** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **Т.Х.Салихов** – доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **А.Р.Ғайзиев** – узви вобаста, доктори илмҳои геология ва минералогия, профессор; **Ҷ.Х.Холиков** – академик, доктори илми химия, профессор.

**МУНДАРИҶА**

**МАТЕМАТИКА**

**Д.К.Тухлиев, Ш.Наҷмидин.** Бехтарин наздиққунии миёнакватратӣ дар фазои Бергман  $B_2$  ..... 7  
**А.Н.Давлатов.** Оид ба наздиқшавии мутлақи қаторҳо дар фазоҳои топологӣ..... 22  
**Р.Н.Одинаев, С.Ҳ. Мавлонзода.** Моделсозии математикӣ ва компютерии масъалаи нақлиёт ва истифодаи он дар ҳалли масъалаҳои иқтисодии НБО Роғун..... 30

**ИНФОРМАТИКА**

**М.Ф.Раҳимов, Ф.С.Комилиён.** Таҳлили хусусиятҳои архитектураҳои монолитӣ ва микросервисӣ..... 44

## **АСТРОНОМИЯ**

**Г.И.Қохирова, А.М.Буриев, С.Н.Сафаров, Ф.Қ.Раҳматуллоева.** Натиҷаҳои мушоҳидаҳои астрометрии астероиди 2011 XZ1 дар расадхонаи астрономии Санглох ..... 54

## **ФИЗИКА**

**Ҳ.М.Абдуллоев, Э.Қ.Шоимов, Р.Т.Қодиров, Ш.П.Исмаев.** Хосиятҳои релаксационӣ ва мустаҳкамӣ-деформационии сополиэфирҳои дукомпонентии моеъкристаллӣ ..... 63

**У.Қ.Раҳимова, М.Ҳ.Эгамов, Ҳ.Ш.Ғаюров.** Дигаргуншавии ҳамвории поляризатори дар кристалли моеи нематикӣ навъи 4-пентил-4-сианобифенил ..... 73

## **ХИМИЯИ ОРГАНИКӢ**

**Э.Х.Пулатов, Д.Д.Тоҳиров, М.З.Турдиалиев, Б.Г.Мавлонов, С.А.Умаров.** Тиазолидинҳо ва триадиазинҳои пайвастишуда бо 1,4-бензодиоксан ..... 80

## **ХИМИЯИ ҒАЙРИОРГАНИКӢ**

**А.С.Қурбонов, Қ.И.Нематуллоев, С.М.Досаев, Н.А.Ашурзода, И.М.Раҳимов, М.М.Тағоев.** Чустуҷу ва арзиши имконияти коркардани маъдани оҳандор дар Хоронгон ..... 90

**М.Т.Жумаев, Л.С.Солиев.** Изотермаи фазаҳосилшавӣ ва ҳалшавандагии системаи  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  дар  $50^\circ\text{C}$  ..... 95

**А.Шарифов, У.М.Мирсаидов, А. Муродиён, М.А.Шодмонова, Х.А.Хусайнов.** Захираҳои дурнамои раванки энергетикаи гидрогенӣ дар Тоҷикистон ..... 103

## **ХИМИЯИ ФИЗИКАВӢ**

**Н.Х.Шарафов, А.Муродиён, Ф.Шоқир, А.Г.Сафаров, К.Ботуров, Ф.Р.Одинаев.** Таҳқиқи рӯйкаш дар заминаи ашёи хоми маҳаллӣ барои электродҳои кафшери камонӣ ..... 112

## **ГЕОХИМИЯ**

**М.М.Мамадзафоев, Д.А.Давлатшоев.** Оиди алоқаи коррелясионӣ байни унсурҳои петрогении гранитоидҳо ва лампрофирҳои комплексҳои интрузивии майдони маъданноки Кафандара (Тоҷикистони Марказӣ) ..... 120

## **ГЕОЛОГИЯ**

**Б.А.Аламов, Ш.А.Файзуллоев, Д.Ф.Байгенов, М.Р.Раҳимбекова, У.А.Шарифов.** Дарачаи таъсирпазирии пастхамиҳои водии дарёи Обихингоу аз ярҷҳо ..... 136

## **ЭНЕРГЕТИКА**

**М.Илолов, С.О.Қабиров, С.Расулов, Қ.Ш.Раҳматов, Н.Ш.Юсуфбеков.** Дар бораи захираҳои энергетикӣ офтоб ва истеҳсоли ҳидрогени сабз дар мавзеи кӯли Қарокӯл (Помири Шарқӣ) ..... 147

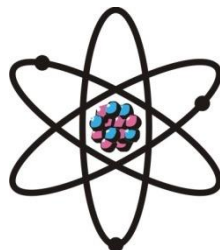
## **ЁДБУДИ ОЛИМ**

**Академик Хайдар Сафиев** ..... 157

**Академик Саидмуҳаммад Одинаев (19.10.1942 – 03.08.2023)** ..... 162

**DEPARTMENT OF  
PHYSICAL, MATHEMATICAL, CHEMICAL,  
GEOLOGICAL AND TECHNICAL SCIENCES**

The journal was established  
in January 1952



*№ 4 (193)*  
2023

---

**EDITORIAL BOARD**

**G.I.Kokhirova** Doctor of Physical and Mathematical, Editor-in-Chief; Prof. **S.A.Iskhokov**, Doctor of Physical and Mathematical, Deputy Editor-in-Chief; **S.H.Abdulaeva**, Secretary; **O.Amirzoda**, Doctor of Engineering; **Kh.M.Akhmedov**, Doctor of Chemistry; Prof. **P.B.Babadzhanov**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **A.Badalov**, Doctor of Chemistry; Prof. **A.R.Faysiev**, Doctor of Geology and Mineralogy; Prof. **M.I.Holov**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **I.N.Ganiev**, Doctor of Chemistry; Prof. **D.Kh.Khalikov**, Doctor of Chemistry; **S.R.Mavloni**, Doctor of Geology and Mineralogy; Prof. **U.M.Mirsaidov**, Doctor of Chemistry; **S.Kh.Negmatullaev**, Doctor of Engineering; Prof. **D.N.Nizomov**, Doctor of Engineering; Prof. **S.O.Odinaev**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **N.R.Rajabov**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **F.Rakhimi**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **Z.Kh.Rakhmonov**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **T.Kh.Salihov**, Doctor of Engineering.

**CONTENTS**

**MATHEMATICS**

- D.K.Tukhliev, Sh.Najmidin.** Best mean square approximation in Bergman space  $B_2$ ..... 7  
**A.N.Davlatov.** On the criteria of absolute  $p$ -convergence of series in a topological vector space..... 22  
**R.N.Odinaev, S.H.Mavlonzoda.** Mathematical and computer modeling of the transport problem and its application in solving economic problems of the Rogun HPP ..... 30

**INFORMATICS**

- M.F.Rakhimov, F.S.Komiliyon.** Analysis of characteristics of monolithic and microservice architectures ..... 44

**ASTRONOMY**

- G.I.Kokhirova, A.M.Buriev, S.N.Safarov, F.J.Rakhmatulloeva.** Astrometric observations of asteroid 2011 XZ1 at Sangloch astronomic observatory ..... 55

## PHYSICS

- Kh.M.Abdullaev, E.D.Shaimov, R.T.Kadirov, Sh.P.Ismatov.** Relaxation and deformation-strength properties of two-component liquid crystalline copolyesters ..... **63**
- U.J.Rakhimova, M.Kh.Egamov, Kh.Sh.Gayrov.** Changes in the plane of polarization of light in nematic liquid crystals based on 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl..... **73**

## ORGANIC CHEMISTRY

- E.Kh.Pulatov, D.D.Tokhirov, M.Z.Turdialiev, B.G.Mavlonov, S.A.Umarov.** Thiazolidine and thiadiazine conjugated with 1,4-benzodioxane..... **80**

## INORGANIC CHEMISTRY

- A.S.Kurbonov, K.I.Nematulloev, S.M.Dosaev, N.A.Ashurzoda, I.M.Rakhimov, M.M.Tagoev.** Search and evaluation of the possibility of processing iron-containing ores in Tajikistan ..... **90**
- M.T.Jumaev, L.Soliev.** Isotherm of phase formation and solubility of the  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  system at 50°C..... **95**
- A.Sharifov, U.M.Mirsaidov, A.Murodiyov, M.A.Shodmonova, H.A.Khusaynov.** Resources and prospects for the development of hydrogen energy in Tajikistan ..... **103**

## PHYSICAL CHEMISTRY

- N.H.Sharafov, A.Murodiyov, F.Shokir, A.G.Safarov, K.Boturov, F.R.Odinaev.** Research on catings from local raw materials for arc welding electrodes..... **112**

## GEOCHEMISTRY

- M.M.Mamadvafoev, D.A.Davlatshoev.** On correlation between petrogenic elements of granitoids and lamprofires of the intrusive complexes of Kafandara ore field (Central Tajikistan)..... **120**

## GEOLOGY

- B.A.Alamov, Sh.A.Faizulloev, D.F.Baigenov, M.R.Rakhimbekova, U.A.Sharifov.** The degree of susceptibility of the slopes of the Obikhingou river valley to the occurrence of landslides ..... **136**

## ENERGETICS

- M.Holov, Sh.O.Kabirov, S.Rasulov, J.Sh.Rahmatov, N.Sh.Yusufbekov.** On potential energy resources of solar energy and green hydrogen production in the region of lake Karakul (Eastern Pamir)..... **147**

## MEMORY OF SCIENTIST

- Academician Haydar Safiev** ..... **157**
- Академик Saidmyhammad Odinaev (19.10.1942 – 03.08.2023)** ..... **162**

УДК 517.5

Специальность: 1.1.1 – Вещественный, комплексный и функциональный анализ

Д.К.ТУХЛИЕВ, Ш.НАДЖМИДИН\*

**НАИЛУЧШЕЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ  
В ПРОСТРАНСТВЕ БЕРГМАНА  $B_2$**

*Худжандский государственный университет им. Б.Гафурова,  
\*Бохтарский государственный университет им. Н.Хусрава*

*Поступила в редакцию 23.10.2023 г.*

*В работе найдены точные неравенства между наилучшими полиномиальными среднеквадратическими приближениями аналитических в единичном круге функций и усреднёнными значениями модулей непрерывности производных в пространстве Бергмана. Вычислены значения различных  $n$ -поперечников некоторых классов функций.*

**Ключевые слова:** наилучшее среднеквадратическое приближение, пространство Бергмана, модуль непрерывности,  $n$ -поперечники.

**1. Введение.** Экстремальные задачи наилучшего полиномиального приближения аналитических в круге функций в различных нормированных пространствах изучались, например, в работах [1]-[14] и многих других. В данной работе решен ряд экстремальных задач в пространстве Бергмана  $B_2$ : найдены верхние грани наилучшего среднеквадратического приближения некоторых классов функций и вычислены точные значения различных  $n$ -поперечников указанных классов функций.

Пусть  $\mathbb{N}, \mathbb{Z}_+$  – соответственно множество натуральных и целых неотрицательных чисел. Пусть далее  $\mathbb{C}$  – комплексная плоскость,  $U := \{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$  – единичный круг в  $\mathbb{C}$ ,  $A(U)$  – множество функций, аналитических в круге  $U$ .

**Определение.** [8] *Говорят, что аналитическая в единичном круге  $U$  функция*

---

*Адрес для корреспонденции:* Тухлиев Дилишод Камаридинович. 735700, Республика Таджикистан, г.Худжанд, ул.Мавлонбекова, 1, Худжандский государственный университет им. Б.Гафурова.  
E-mail: dtukhliev@mail.ru

$$f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k(f) z^k, \quad z = \rho e^{it}, \quad 0 \leq \rho < 1, \quad 0 \leq t \leq 2\pi \quad (1)$$

принадлежит пространству Бергмана  $B_2$ , если

$$\|f\|_2 := \|f\|_{B_2} = \left( \frac{1}{\pi} \iint_{(U)} |f(z)|^2 d\sigma \right)^{1/2} < \infty.$$

Производную  $r$ -го порядка функции  $f \in A(U)$  определим, как обычно,

$$f^{(r)}(z) := \frac{d^r f(z)}{dz^r} = \sum_{k=r}^{\infty} k(k-1) \cdots (k-r+1) c_k(f) z^{k-r}, \quad r \in \mathbb{N}. \quad (2)$$

Ради краткости, введём обозначение

$$\alpha_{k,r} := k(k-1) \cdots (k-r+1) = k! / (k-r)!, \quad k, r \in \mathbb{N}, \quad k > r. \quad (3)$$

Всюду далее символом  $B_2^{(r)}$  ( $r \in \mathbb{Z}_+, B_2^{(0)} = B_2$ ) обозначим множество функций  $f \in A(U)$ , принадлежащих пространству  $B_2$ , производная  $r$ -го порядка  $f^{(r)}(z)$  которых также принадлежит  $B_2$ , то есть

$$B_2^{(r)} := \{f \in B_2 : \|f^{(r)}\|_2 < \infty\}.$$

Пусть  $\mathcal{P}_n$  – подпространство комплексных алгебраических многочленов степени  $n$  вида

$$p_n(z) = \sum_{k=0}^n a_k z^k, \quad a_k \in \mathbb{C}.$$

Величину

$$E_n(f)_2 := E(f, \mathcal{P}_n)_{B_2} = \inf \{ \|f - p_n\|_2 : p_n \in \mathcal{P}_n \}$$

называют наилучшим полиномиальным среднеквадратическим приближением функции  $f \in B_2$  подпространствам  $\mathcal{P}_n$ .

Хорошо известно [15, с.203], что для произвольной функции  $f \in B_2$  имеет место соотношение

$$E_{n-1}(f)_2 = \|f - T_{n-1}(f)\|_2 = \left\{ \sum_{k=n}^{\infty} \frac{|c_k(f)|^2}{k+1} \right\}^{1/2},$$

где  $T_{n-1}(f)$  – частная сумма порядка  $n-1$  ряда (1).



Запишем норму (1) в более удобном виде

$$\|f\|_2 := \left( \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(\rho e^{it})|^2 \rho d\rho dt \right)^{1/2},$$

и символом

$$\Delta_h^1 f(\rho e^{it}) = f(\rho e^{i(t+h)}) - f(\rho e^{it})$$

обозначим конечную разность первого порядка функции  $f \in B_2$  по аргументу  $t$  с шагом  $h$ . Равенством

$$\begin{aligned} \omega(f, \tau)_{B_2} &:= \sup \left\{ \|\Delta_h^1(f)\|_{B_2} : |h| \leq \tau \right\} = \\ &= \sup_{|h| \leq \tau} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(\rho e^{i(t+h)}) - f(\rho e^{it})|^2 d\rho dt \end{aligned}$$

определим модуль непрерывности первого порядка функции  $f \in B_2$ . Пользуясь соотношениями (2) и (3), для любого  $r \in \mathbb{Z}_+$  имеем

$$\Delta_h^1 f^{(r)}(\rho e^{it}) = \sum_{k=r+1}^{\infty} \alpha_{k,r} c_k(f) \rho^{k-r} e^{i(k-r)t} (1 - e^{i(k-r)h}).$$

Отсюда, применяя тождество Парсеваля, получаем

$$\|\Delta_h^1 f^{(r)}\|^2 = 2 \sum_{k=r+1}^{\infty} \alpha_{k,r}^2 \frac{|c_k(f)|^2}{k-r+1} (1 - \cos(k-r)h)$$

и, следовательно,

$$\omega^2(f^{(r)}, \tau)_{B_2} = 2 \sup_{|h| \leq \tau} \sum_{k=r+1}^{\infty} \alpha_{k,r}^2 \frac{|c_k(f)|^2}{k-r+1} (1 - \cos(k-r)h). \quad (4)$$

**2. Основные результаты.** В этом пункте излагаем основные результаты, полученные в данной статье. Имеет место следующая

**Теорема 1.** Для любой функции  $f \in B_2$  и любого наперёд заданного  $n \in \mathbb{N}$  при любом  $h \in (0, \pi/n]$  справедливо неравенство

$$E_{n-1}^2(f)_{B_2} \leq \frac{\int_0^h \omega^2(f, t)_{B_2} \cdot \sin \frac{\pi}{h} t dt}{2 \left[ \frac{2h}{\pi} - \int_0^h \cos nt \cdot \sin \frac{\pi}{h} t dt \right]}. \quad (5)$$

Для функции  $f_0(z) = z^n \in B_2$  неравенство (5) обращается в равенство для всех  $h \in (0, \pi/n]$ .

**Доказательство.** Пользуясь определением модуля непрерывности запишем

$$\begin{aligned} \omega^2(f, t)_{B_2} &\geq \|f(\cdot + t) - f(\cdot)\|_{B_2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \rho |f(\rho e^{i(x+t)}) - f(\rho e^{ix})|^2 d\rho dx = \\ &= 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{|c_k(f)|^2}{k+1} \cdot (1 - \cos kt) \geq 2 \sum_{k=n}^{\infty} \frac{|c_k(f)|^2}{k+1} \cdot (1 - \cos kt). \end{aligned} \quad (6)$$

В предположении  $h \in (0, \pi/n]$  умножим обе части неравенства (6) на функцию  $\sin \frac{\pi}{h} t$  и проинтегрируем по  $t$  от 0 до  $h$ . В итоге получаем

$$\begin{aligned} \int_0^h \omega^2(f, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{h} t &\geq 2 \sum_{k=n}^{\infty} \frac{|c_k(f)|^2}{k+1} \cdot \int_0^h (1 - \cos kt) \sin \frac{\pi}{h} t dt = \\ &= 2 \sum_{k=n}^{\infty} \frac{|c_k(f)|^2}{k+1} \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi}{h} t dt - 2 \sum_{k=n}^{\infty} \frac{|c_k(f)|^2}{k+1} \cdot \int_0^h \cos kt \sin \frac{\pi}{h} t dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Теперь заметим, что функция натурального аргумента  $\varphi(k) = \int_0^h \cos kt \sin \frac{\pi}{h} t dt$  убывает по

$k \in \mathbb{N}$  при  $h \in (0, \frac{\pi}{k}]$ , так как производная

$$\varphi'(k) = - \int_0^h t \sin kt \sin \frac{\pi}{h} t dt < 0.$$

Поэтому при  $h \in (0, \pi/k]$ ,  $t \in (0, h)$  и  $k \geq n$

$$\int_0^h \cos kt \sin \frac{\pi}{h} t dt \leq \int_0^h \cos nt \sin \frac{\pi}{h} t dt. \quad (8)$$

При  $h \in (\pi/k, \pi/n]$ ,  $t \in (0, h)$  и  $k \geq n$  снова имеет место (8), так как

$$\begin{aligned} \int_0^h \cos kt \sin \frac{\pi}{h} t dt &= \frac{2\pi h}{\pi^2 - h^2 k^2} \cos^2 \frac{kh}{2} \leq 0, \\ \int_0^h \cos nt \sin \frac{\pi}{h} t dt &= \frac{2\pi h}{\pi^2 - h^2 n^2} \cos^2 \frac{nh}{2} \geq 0. \end{aligned}$$

Таким образом, при всех  $h \in (0, \pi/n]$ ,  $t \in (0, h)$  и  $k \geq n$

$$\int_0^h \cos kt \sin \frac{\pi}{h} t dt \leq \int_0^h \cos nt \sin \frac{\pi}{h} t dt.$$

Отсюда из (7) получаем

$$\begin{aligned} \int_0^h \omega^2(f, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{h} t &\geq \frac{4h}{\pi} E_{n-1}^2(f)_{B_2} - 2E_{n-1}^2(f)_{B_2} \cdot \int_0^h \cos nt \sin \frac{\pi}{h} t dt = \\ &= E_{n-1}^2(f)_{B_2} \left[ \frac{4h}{\pi} - 2 \cdot \int_0^h \cos nt \sin \frac{\pi}{h} t dt \right], \end{aligned}$$

откуда и следует неравенство (5). Знак равенства для  $f_0(z) = z^n \in B_2$  проверяется непосредственным вычислением.

**Замечание 1.** Так как при  $h = \pi/n$

$$\int_0^{\pi/n} \cos nt \sin ntdt = 0,$$

то из (5) получаем

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{n}{2} \cdot \int_0^{\pi/n} \omega^2(f, t)_{B_2} \sin ntdt \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Неравенство (9) является аналогом известного неравенства Н.И.Черныха [16], доказанного для класса периодических функций  $L_2 := L_2[0, 2\pi]$  на случай аналитических в единичном круге функций, принадлежащих пространству Бергмана  $B_2$ .

**Теорема 2.** Для любой функции  $f \in B_2^{(r)}$ ,  $r \in \mathbb{Z}_+$  и любой  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n > r$  справедливо неравенство

$$E_{n-1}^2(f)_{B_2} \leq \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \frac{\int_0^h \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{h} t dt}{\int_0^h (1 - \cos(n-r)t) \sin \frac{\pi}{h} t dt}. \quad (10)$$

**Доказательство.** В [17] доказано, что для произвольной функции  $f \in B_2^{(r)}$  при любых  $n \in \mathbb{N}$ ,  $r \in \mathbb{Z}_+$ ,  $n > r$  имеет место неравенство

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot E_{n-r-1}(f^{(r)})_{B_2}. \quad (11)$$

В силу теоремы 1 имеем

$$\begin{aligned}
E_{n-r-1}(f^{(r)})_{B_2} &\leq \frac{\left\{ \int_0^h \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{h} t dt \right\}^{1/2}}{\left\{ 2 \left[ \frac{2h}{\pi} - \int_0^h \cos(n-r)t \sin \frac{\pi}{h} t dt \right] \right\}^{1/2}} = \\
&= \frac{\left\{ \int_0^h \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{h} t dt \right\}^{1/2}}{\left\{ 2 \int_0^h (1 - \cos(n-r)t) \sin \frac{\pi}{h} t dt \right\}^{1/2}}. \tag{12}
\end{aligned}$$

Учитывая неравенство (12), из (11) получаем

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \frac{\left\{ \int_0^h \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{h} t dt \right\}^{1/2}}{\left\{ 2 \int_0^h (1 - \cos(n-r)t) \sin \frac{\pi}{h} t dt \right\}^{1/2}}$$

и, таким образом, неравенство (10) доказано. Легко проверить, что неравенство (10) для функции  $f_0(z) = z^n \in B_2^{(r)}$ ,  $n > r$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ,  $r \in \mathbb{Z}_+$  обращается в равенство.

**Следствие 1.** В условиях теоремы при  $h = \pi / (n-r)$ ,  $n > r$  имеет место неравенство

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \left\{ \frac{n-r}{2} \cdot \int_0^{\pi/(n-r)} \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin(n-r)t dt \right\}^{1/2}. \tag{13}$$

**Следствие 2.** Для произвольной функции  $f_0 \in B_2^{(r)}$  при любых  $n \in \mathbb{N}$ ,  $r \in \mathbb{Z}_+$ ,  $n > r$  имеет место неравенство типа Джексона

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \omega\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{n-r}\right)_{B_2}. \tag{14}$$

Неравенство (14) является следствием монотонно возрастающего модуля непрерывности  $\omega(f^{(r)}, t)_{B_2}$  на отрезке  $[0, \pi / (n-r)]$ . Но, если модуль непрерывности  $\omega(f^{(r)}, t)_{B_2}$  на отрезке  $[0, \pi / (n-r)]$  является выпуклой вверх функцией, то есть для любых  $t \in [0, \pi / (n-r)]$  удовлетворяет условию

$$\omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} + \omega^2\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{n-r} - t\right)_{B_2} \leq 2\omega^2\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{n-r}\right)_{B_2}, \quad (15)$$

то неравенство (14) можно уточнить.

**Следствие 3.** На множестве функций  $f \in B_2^{(r)}$ , у которых функция  $\omega(f^{(r)}, t)_{B_2}$  удовлетворяет условию (15), справедливо неравенство

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \omega\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{2(n-r)}\right)_{B_2}. \quad (16)$$

Существует функция  $f_0 \in B_2^{(r)}$ , которая обращает (16) в равенство.

**Доказательство.** Для произвольной функции  $f \in B_2^{(r)}$  с учетом неравенства (15) имеем

$$\begin{aligned} & \int_0^{\pi/(n-r)} \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin(n-r)t dt = \int_0^{\pi/2(n-r)} \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin(n-r)t dt + \\ & + \int_{\pi/2(n-r)}^{\pi/(n-r)} \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin(n-r)t dt = \int_0^{\pi/2(n-r)} \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin(n-r)t dt + \\ & + \int_0^{\pi/2(n-r)} \omega^2\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{n-r} - t\right)_{B_2} \sin(n-r)t dt = \\ & = \int_0^{\pi/2(n-r)} \left[ \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} + \omega^2\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{n-r} - t\right)_{B_2} \right] \sin(n-r)t dt \leq \\ & \leq \int_0^{\pi/2(n-r)} 2\omega^2\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{2(n-r)}\right)_{B_2} \sin(n-r)t dt = \frac{2}{n-r} \cdot \omega^2\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{2(n-r)}\right)_{B_2}, \end{aligned}$$

откуда сразу следует, что

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \omega\left(f^{(r)}, \frac{\pi}{2(n-r)}\right)_{B_2}$$

и неравенство (16) доказано.

Докажем, что для функции  $f_0(z) = z^n \in B_2^{(r)}$  неравенство (16) обращается в равенство. Для этой функции  $E_{n-1}(f_0)_{B_2} = \frac{1}{\sqrt{n+1}}$  и так как  $f_0^{(r)}(z) = \alpha_{n,r} z^{n-r}$ ,  $n > r$ , то в силу формулы (4) имеем

$$\begin{aligned}\omega\left(f_0^{(r)}, t\right)_{B_2} &= \frac{\sqrt{2} \cdot \alpha_{n,r}}{\sqrt{n-r+1}} \cdot (1 - \cos(n-r)t)^{1/2}, \\ \omega\left(f_0^{(r)}, \frac{\pi}{2(n-r)}\right)_{B_2} &= \frac{\sqrt{2} \cdot \alpha_{n,r}}{\sqrt{n-r+1}}.\end{aligned}\tag{17}$$

Пользуясь этими равенствами запишем

$$\begin{aligned}&\sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \omega\left(f_0^{(r)}, \frac{\pi}{2(n-r)}\right)_{B_2} = \\ &= \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \alpha_{n,r}}{\sqrt{n-r+1}} = \frac{1}{\sqrt{n+1}} = E_{n-1}(f_0)_{B_2}\end{aligned}$$

и следствие 3 доказано.

**Следствие 4.** В условиях следствия 3 имеет место равенство

$$\sup_{f \in B_2^{(r)}} \frac{\sqrt{(n+1)/(n-r+1)} \cdot \alpha_{n,r} \cdot E_{n-1}(f)_{B_2}}{\omega(f^{(r)}, \pi/2(n-r))_{B_2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.\tag{18}$$

**Доказательство.** В самом деле, так как неравенство (14) верно для любой функции  $f \in B_2^{(r)}$ , то из него вытекает оценка сверху величины, стоящей в левой части (18):

$$\sup_{f \in B_2^{(r)}} \frac{\sqrt{(n+1)/(n-r+1)} \cdot \alpha_{n,r} \cdot E_{n-1}(f)_{B_2}}{\omega(f^{(r)}, \pi/2(n-r))_{B_2}} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}.\tag{19}$$

С другой для экстремальной функции  $f_0(z) = z^n \in B_2^{(r)}$ ,  $n > r$  с учётом равенств (17) получаем оценку снизу

$$\begin{aligned}&\sup_{f \in B_2^{(r)}} \frac{\sqrt{(n+1)/(n-r+1)} \cdot \alpha_{n,r} \cdot E_{n-1}(f)_{B_2}}{\omega(f^{(r)}, \pi/2(n-r))_{B_2}} \geq \\ &\geq \frac{\sqrt{(n+1)/(n-r+1)} \cdot \alpha_{n,r} \cdot E_{n-1}(f_0)_{B_2}}{\omega(f_0^{(r)}, \pi/2(n-r))_{B_2}} = \\ &= \frac{\sqrt{(n+1)/(n-r+1)} \cdot \alpha_{n,r} / \sqrt{(n+1)}}{\sqrt{2} \cdot \alpha_{n,r} / \sqrt{(n-r+1)}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.\end{aligned}\tag{20}$$

Равенство (18) получаем из сравнения оценки сверху (19) с оценкой снизу (20), чем и завершаем доказательство следствия 4.

**Замечание 2.** Из утверждения следствия 2 в случае  $r = 0$  для произвольной функции  $f \in B_2$  вытекает неравенство

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \omega\left(f, \frac{\pi}{n}\right)_{B_2},$$

которое является аналогом известного неравенства Н.И.Черныха [16]. Аналогичным образом из утверждения следствия 3 в случае, когда модуль непрерывности при  $r = 0$  произвольной функции  $f \in B_2$  является выпуклой вверх функцией, получаем

$$E_{n-1}(f)_{B_2} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \omega\left(f, \frac{\pi}{2n}\right)_{B_2}. \quad (21)$$

Неравенство (21) является аналогом неравенства типа Н.П.Корнейчука [18, с.241, неравенство (9.33)] и легко проверить, что для функции  $f_0(z) = z^n \in B_2$  является точным и, таким образом, точная константа в неравенстве Джексона равна

$$K := \sup_{f \in B_2} \frac{E_{n-1}(f)_{B_2}}{\omega(f, \pi / (2n))_{B_2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

**3. Точные значения  $n$ -поперечников некоторых классов функций.** Для формулировки последующих результатов напомним необходимые понятия и определения из теории  $n$ -поперечников (см., например, [19,20]).

Пусть  $S := \{f : \|f\| \leq 1\}$  – единичный шар в  $B_2$ ;  $\mathfrak{M}$  – выпуклое центрально-симметричное подмножество из пространства  $B_2$ ;  $\Lambda_n \subset B_2$  – произвольное  $n$ -мерное подпространство;  $\Lambda^n \subset B_2$  – подпространство коразмерности  $n$ ;  $A: B_2 \rightarrow \Lambda_n$  – непрерывный линейный оператор;  $A^\perp: B_2 \rightarrow \Lambda^n$  – непрерывный оператор линейного проектирования.

Величины

$$b_n(\mathfrak{M}, B_2) = \sup \left\{ \sup \{ \varepsilon > 0 : \varepsilon S \cap \Lambda_{n+1} \subset \mathfrak{M} \} : \Lambda_{n+1} \subset B_2 \right\},$$

$$d_n(\mathfrak{M}, B_2) = \inf \left\{ \sup \left\{ \inf \left\{ \|f - \varphi\|_{B_2} : \varphi \in \Lambda_n \right\} : f \in \mathfrak{M} \right\} : \Lambda_n \subset B_2 \right\},$$

$$\delta_n(\mathfrak{M}, B_2) = \inf \left\{ \inf \left\{ \sup \left\{ \|f - Af\|_{B_2} : f \in \mathfrak{M} \right\} : AB_2 \subset \Lambda_n \right\} : \Lambda_n \subset B_2 \right\},$$

$$d^n(\mathfrak{M}, B_2) = \inf \left\{ \sup \left\{ \|f\|_{B_2} : f \in \mathfrak{M} \cap \Lambda^n \right\} : \Lambda^n \subset B_2 \right\},$$

$$\Pi_n(\mathfrak{M}, B_2) = \inf \left\{ \inf \left\{ \sup \left\{ \|f - A^\perp f\|_{B_2} : f \in \mathfrak{M} \right\} : A^\perp B_2 \subset \Lambda_n \right\} : \Lambda_n \subset B_2 \right\}$$

называют соответственно *бернштейновским*, *колмогоровским*, *линейным*, *гельфандовским*, *проекционным*  $n$ -*поперечниками* подмножества  $\mathfrak{M} \subset B_2$ .

Перечисленные  $n$ -поперечники монотонны по  $n$  и в гильбертовом пространстве  $B_2$  связаны соотношениями [19],[20]:

$$b_n(\mathfrak{M}, B_2) \leq d^n(\mathfrak{M}, B_2) \leq d_n(\mathfrak{M}, B_2) = \delta_n(\mathfrak{M}, B_2) = \Pi_n(\mathfrak{M}, B_2).$$

Рассмотрим теперь следующий класс функций. Пусть  $\Phi(u)$  – произвольная положительная возрастающая при  $u \geq 0$  функция,  $\Phi(0) = 0$ . Для  $r \in \mathbb{Z}_+$  определим класс  $W_2^{(r)}(\Phi)$  с помощью мажоранты  $\Phi$  для  $u \in (0, 2\pi]$  функций  $f \in B_2^{(r)}$ , удовлетворяющих условию

$$\frac{\pi}{2u} \int_0^u \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{u} t dt \leq \Phi^2(u).$$

Вычислим точные значения перечисленных выше  $n$ -поперечников класса  $W_2^{(r)}(\Phi)$ . Вводим обозначение

$$\begin{cases} 1 - \cos t, & \text{если } t \leq \pi, \\ 2, & \text{если } t > \pi. \end{cases}$$

В этих обозначениях справедлива следующая

**Теорема 3.** *Если для любого  $\mu > 0$  и для всех  $u \in (0, 2\pi]$  функция  $\Phi(u)$  удовлетворяет условию*

$$\frac{1}{2\mu} \Phi^2 \left( \frac{u}{\mu} \right) \int_0^{\mu\pi} (1 - \cos v)_* \sin \frac{v}{\mu} dt \leq \Phi^2(u), \quad (22)$$

то для любых  $n \in \mathbb{N}$ ,  $r \in \mathbb{Z}_+$ ,  $n > r$  имеют место равенства

$$\begin{aligned} \lambda_n(W_2^{(r)}(\Phi), B_2) &= E_{n-1}(W_2^{(r)}(\Phi))_{B_2} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \Phi \left( \frac{\pi}{n-r} \right), \end{aligned} \quad (23)$$

где  $\lambda_n(\cdot)$  любой из вышеперечисленных  $n$ -поперечников, а

$$E_{n-1}(\mathfrak{N})_{B_2} := \sup \{ E_{n-1}(f) : f \in \mathfrak{N} \}.$$



**Доказательство.** Из неравенства (13) с учётом определения класса  $W_2^{(r)}(\Phi)$  для любого  $f \in B_2^{(r)}$  получаем

$$\begin{aligned} E_{n-1}(f) &\leq \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left\{ \frac{n-r}{2} \cdot \int_0^{\pi/(n-r)} \omega^2(f^{(r)}, t)_{B_2} \sin(n-r)t dt \right\}^{1/2} \\ &\leq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \Phi\left(\frac{\pi}{n-r}\right), \end{aligned}$$

откуда, переходя в обеих частях полученного неравенства к верхним граням по всем функциям  $f \in W_2^{(r)}(\Phi)$ , имеем оценку сверху всех  $n$ -поперечников

$$\begin{aligned} \lambda_n(W_2^{(r)}(\Phi), B_2) &\leq E_{n-1}(W_2^{(r)}(\Phi))_{B_2} \leq \\ &\leq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \Phi\left(\frac{\pi}{n-r}\right). \end{aligned} \quad (24)$$

С целью получения оценки снизу перечисленных выше  $n$ -поперечников класса  $W_2^{(r)}(\Phi)$  для произвольного полинома

$$p_n(z) = \sum_{k=0}^n a_k z^k, \quad a_k \in \mathbb{C}, k = \overline{0, n}, n \in \mathbb{N},$$

заданной степени  $n$ , оценим  $\omega(p_n^{(r)}, t)_{B_2}$  при условии, что  $0 \leq t \leq \pi/(n-r)$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ,  $r \in \mathbb{Z}_+, n > r$ . Имеем

$$\begin{aligned} &\| p_n(\rho e^{i(x+t)}) - p_n^{(r)}(\rho e^{ix}) \|_{B_2}^2 = \\ &= 2 \sum_{k=r}^n \alpha_{k,r}^2 \cdot \frac{|a_k|^2}{k-r+1} \cdot (1 - \cos(k-r)t)_* = \\ &= 2 \sum_{k=r}^n \alpha_{k,r}^2 \cdot \frac{k+1}{k-r+1} \cdot (1 - \cos(k-r)t)_* \cdot \frac{|a_k|^2}{k-r+1} \leq \\ &\leq 2 \max_{r \leq k \leq n} \alpha_{k,r}^2 \cdot \frac{k+1}{k-r+1} \cdot (1 - \cos(k-r)t)_* \cdot \sum_{k=r}^n \frac{|a_k|^2}{k+1} \leq \\ &\leq 2 \max_{r \leq k \leq n} \alpha_{k,r}^2 \cdot \frac{k+1}{k-r+1} \cdot (1 - \cos(k-r)t)_* \cdot \| p_n \|_{B_2}^2. \end{aligned} \quad (25)$$

Простыми вычислениями легко убедиться, что

$$\max_{r \leq k \leq n} \alpha_{k,r}^2 \cdot \frac{k+1}{k-r+1} = \alpha_{n,r}^2 \cdot \frac{n+1}{n-r+1},$$

пользуясь этим равенством, из (25) получаем следующее неравенство типа Бернштейна

$$\omega^2(p_n^{(r)}, t)_{B_2} \leq 2 \cdot \alpha_{n,r}^2 \cdot \frac{n+1}{n-r+1} \cdot (1 - \cos(n-r)t)_* \cdot \|p_n\|_{B_2}^2 \quad (26)$$

для всех  $t \in (0, \pi/(n-r)]$ . Неравенство (26) умножим на функцию  $\frac{\pi}{2u} \sin \frac{\pi}{u} t$  и интегрируем по  $t$  от 0 до  $u$ . В итоге, имеем

$$\begin{aligned} & \frac{\pi}{2u} \int_0^u \omega^2(p_n^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{u} t dt \leq \\ & \leq 2 \cdot \alpha_{n,r}^2 \cdot \frac{n+1}{n-r+1} \cdot \|p_n\|_{B_2}^2 \cdot \frac{\pi}{2u} \int_0^u (1 - \cos(n-r)t)_* \sin \frac{\pi}{u} t dt. \end{aligned} \quad (27)$$

Теперь легко установить, что для произвольного полинома  $p_n(z) \in \mathcal{P}_n$ , принадлежащего сфере

$$\delta_{n+1} := \left\{ p_n(z) \in \mathcal{P}_n : \|p_n\| = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \Phi\left(\frac{\pi}{n-r}\right) \right\}$$

полином  $p_n(z)$  также принадлежит классу  $W_2^{(r)}(\Phi)$ . Для такого полинома неравенство (27) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{\pi}{2u} \int_0^u \omega^2(p_n^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{u} t dt \leq \\ & \leq 2 \cdot \alpha_{n,r}^2 \cdot \frac{n+1}{n-r+1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{n-r+1}{n+1} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}^2} \cdot \Phi^2\left(\frac{\pi}{n-r}\right) \cdot \frac{\pi}{2u} \int_0^u (1 - \cos(n-r)t)_* \sin \frac{\pi}{u} t dt = \\ & = \frac{\pi}{2u} \cdot \Phi^2\left(\frac{\pi}{n-r}\right) \cdot \int_0^u (1 - \cos(n-r)t)_* \sin \frac{\pi}{u} t dt. \end{aligned}$$

Пусть  $u = \frac{\pi}{n-r} \mu$ . Тогда предыдущее неравенство запишется следующим образом:

$$\frac{\pi}{2u} \int_0^u \omega^2(p_n^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{u} t dt \leq$$

$$\leq \frac{\pi}{2u} \cdot \Phi^2\left(\frac{u}{\mu}\right) \cdot \int_0^u (1 - \cos \frac{\pi\mu}{u} t)_* \sin \frac{\pi}{u} t dt.$$

Сделаем замену переменных в правой части интеграла  $\frac{\pi\mu}{u} t = \tau$  и используем условие (22) теоремы. В результате получаем

$$\begin{aligned} & \frac{\pi}{2u} \int_0^u \omega^2(p_n^{(r)}, t)_{B_2} \sin \frac{\pi}{u} t dt \leq \\ & \leq \frac{\pi}{2} \cdot \frac{u}{\pi\mu u} \cdot \Phi^2\left(\frac{u}{\mu}\right) \cdot \int_0^{\mu\pi} (1 - \cos \tau)_* \sin \frac{\pi}{u} \cdot \frac{u\tau}{\pi\mu} d\tau = \\ & = \frac{1}{2\mu} \cdot \Phi^2\left(\frac{u}{\mu}\right) \cdot \int_0^{\mu\pi} (1 - \cos \tau)_* \sin \frac{\tau}{\mu} d\tau \leq \Phi^2(u). \end{aligned}$$

Отсюда следует, что сфера комплексных алгебраических полиномов  $\delta_{n+1}$  содержится в классе  $W_2^{(r)}(\Phi)$ , а потому, в силу определения *бернштейновского  $n$ -поперечника*, запишем оценки снизу всех  $n$ -поперечников

$$\begin{aligned} \lambda_n(W_2^{(r)}(\Phi), B_2) & \geq b_n(W_2^{(r)}(\Phi), B_2) \geq \\ & \geq b_n(\delta_n, B_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \Phi\left(\frac{\pi}{n-r}\right). \end{aligned} \quad (28)$$

Таким образом, оценка снизу (28) перечисленных выше  $n$ -поперечников совпадает с оценкой сверху (24), и равенство (23) доказано.

В [21] доказано, что условию (22) удовлетворяет функция  $\Phi_*^2(u) = u^{\pi^2/8}$ , и теорема полностью доказана.

Из доказанной теоремы вытекает следующее

**Следствие 5.** В условиях теоремы 3 при любых  $n \in \mathbb{N}$ ,  $r \in \mathbb{Z}_+$ ,  $n > r$  справедливо равенство

$$\begin{aligned} \lambda_n(W_2^{(r)}(\Phi_*), B_2) & = E_{n-1}(W_2^{(r)}(\Phi_*))_{B_2} = \\ & = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \Phi_*\left(\frac{\pi}{n-r}\right) = \\ & = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{n-r+1}{n+1}} \cdot \frac{1}{\alpha_{n,r}} \cdot \left(\frac{\pi}{n-r}\right)^{\frac{\pi^2}{16}}. \end{aligned}$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенко К.И. О наилучших приближениях одного класса аналитических функций. – Изв. АН СССР, 1958, т.22, №5, с. 631-640.
2. Тайков Л.В. О наилучшем приближении в среднем некоторых классов аналитических функций. – Матем. заметки, 1967, т.1, №2, с. 155-162.
3. Тайков Л.В. Поперечники некоторых классов аналитических функций. – Матем. заметки, 1977, т.22, №2, с. 285-295.
4. Двейрин М.З., Чебаненко И.В. О полиномиальной аппроксимации в банаховых пространствах аналитических функций. – Киев: ИМ АН УССР, 1983.
5. Айнуллоев Н., Тайков Л.В. Наилучшие приближения в смысле А.Н.Колмогорова классов аналитических в единичном круге функций. – Матем. заметки, 1986, т.40, 3, с. 341-351.
6. Horowitz Charles. Zeros of functions in Bergman Space. – Bull. Amer. Math. Soc., 1974, vol.80, №4, pp. 713-714.
7. Вакарчук С.Б. О поперечниках некоторых классов аналитических в единичном круге функций I, II. – Укр. матем. журнал, 1990, т.42, №7-8, с. 873-881, 1019-1026.
8. Вакарчук С.Б. Наилучшие линейные методы приближения и поперечники классов аналитических в круге функций. – Матем. заметки, 1995, т.57, №1, с. 30-39.
9. Вакарчук С.Б. О наилучших линейных методах приближения и поперечниках некоторых классов аналитических функций. – Матем. заметки, 1999, т.65, №2, с. 186-193.
10. Вакарчук С.Б., Вакарчук М.Б. Неравенства типа Колмогорова для аналитических функций одной и двух комплексных переменных и их приложение к теории аппроксимации. – Укр. матем. журнал, 2011, т.63, №12, с. 1579-1601.
11. Шабозов М.Ш., Шабозов О.Ш. Поперечники некоторых классов аналитических функций в пространстве Харди  $H_2$ . – Матем. заметки, 2000, т.68, 5, с. 796-800.
12. Шабозов М.Ш., Юсупов Г.А. Наилучшие методы приближения и значения поперечников некоторых классов функций в пространстве  $H_{q,\rho}$ ,  $1 \leq q \leq \infty$ ,  $0 < \rho \leq 1$ . – Сиб. матем. журнал, 2016, т.57, №2, с. 469-478.
13. Шабозов М.Ш., Лангаршоев М.Р. О наилучших линейных методах приближения некоторых классов аналитических в единичном круге функций. – Сиб. матем. журнал, 2019, т.60, №6, с. 1414-1423.
14. Шабозов М.Ш., Саидусайнов М.С. Среднеквадратическое приближение функций комплексного переменного суммами Фурье по ортогональным системам. – Труды ИММ УрО РАН, 2019, т.25, №2, с. 258-272.
15. Смирнов В.И., Лебедев Н.А. Конструктивная теория функций комплексного переменного. – М.-Л.: Наука, 1964, с.201-202.
16. Черных Н.И. О наилучшем приближении периодических функций тригонометрическими полиномами в  $L_2$ . – Матем. заметки, 1967, т.2, №5, с. 513-522.
17. Шабозов М.Ш., Саидусайнов М.С. Верхние грани приближения некоторых классов функций комплексной переменной рядами Фурье в пространстве  $L_2$  и значения  $n$ -поперечников. – Матем. заметки, 2018, т.103, №4, с. 617-631.
18. Корнейчук Н.П. Экстремальные задачи теории приближения. – М.: Наука, 1976, 320 с.
19. Тихомиров В.М. Некоторые вопросы теории приближений. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976, 305 с.
20. Pinkus A.  $n$ -Widths in Approximation Theory. – Berlin: Springer-Verlag, 1985, 312 p.
21. Айнуллоев Н. Значение поперечников некоторых классов дифференцируемых функций в  $L_2$ . – ДАН ТаджССР, 1984, т.17, №8, с. 415-418.

Д.К.ТУХЛИЕВ, Ш.НАЧМИДИН\*

**БЕҲТАРИН НАЗДИККУНИИ МИЁНАКВАДРАТӢ  
ДАР ФАЗОИ БЕРГМАН  $B_2$**

*Донишгоҳи давлатии Хуҷанд ба номи Б.Гафуров,*

*\*Донишгоҳи давлатии Бохтар ба номи Н.Хусрав*

Дар мақола нобаробариҳои аниқ байни беҳтарин наздиккунии миёнаквадратии полиномиалии функсияҳо дар доираи воҳидӣ ва қимати ҳосилаҳои модули бефосилагии, ки ба фазои Бергман таалуқ доранд, ёфта шудаанд. Қимати  $n$ -кутхро барои баъзе синфи функсияҳои аналитикӣ ҳисоб карда шудааст.

**Калимаҳои калидӣ:** беҳтарин наздиккунии миёнаквадратӣ, фазои Бергман, модули бефосилагӣ,  $n$ -кутхро.

D.K.TUKHLIEV, Sh.NAJMIDIN\*

**BEST MEAN SQUARE APPROXIMATION IN BERGMAN SPACE  $B_2$**

*B. Gafurov Khujand State University,*

*\*N. Khusrav Bokhtar State University*

In the work, exact inequalities are found between the best polynomial mean square approximations of functions analytic in the unit disk and averaged values of the modulus of continuity of derivatives in Bergman space. The values of various  $n$  diameters of some classes of functions are calculated.

**Key words:** best mean square approximation, Bergman space, modules of continuity,  $n$ -cross-sections.

**Сведения об авторах:**

**Тухлиев Дилшод Камаридинович** – кандидат физ.-мат. наук, Худжандский государственный университет им. Б.Гафурова, доцент кафедры "Информатика и вычислительная математика". E-mail: dtukhliev@mail.ru

**Шахобиддин Наджмидин** – Бохтарский государственный университет им. Н.Хусрава, магистрант кафедры "Математический анализ и дифференциальные уравнения".

УДК 517.512

Специальность: 1.1.1 – Вещественный, комплексный и функциональный анализ

А.Н.ДАВЛАТОВ

**О КРИТЕРИЯХ АБСОЛЮТНОЙ  $p$ -СХОДИМОСТИ РЯДОВ  
В ТОПОЛОГИЧЕСКОМ ВЕКТОРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

*Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни*

*Поступила в редакцию 12.05.2023 г.*

*Над полем вещественных чисел рассматривается векторное пространство, под которым понимается хаусдорфово топологическое векторное пространство. В этом пространстве топология определяется базисом окрестностей нуля, который удовлетворяет всем трём аксиомам Фона Неймана. Найдены критерии абсолютной  $p$ -сходимости рядов в топологическом векторном пространстве. Доказано, что множество всех абсолютно  $p$ -сходящихся ( $0 < p < \infty$ ) рядов является векторным пространством.*

**Ключевые слова:** линейное пространство, пространство Фреше, базис окрестностей нуля, функционал Минковского, уравновешенные множества, поглощающие множества, топологическое векторное пространство, абсолютная сходимость рядов.

Пусть задано линейное пространство  $L$ . В этом пространстве система  $\tau$  – подмножеств множества  $L$  определяет топологию, если в этой системе  $\tau$  содержится пустое множество  $\emptyset$ , множество  $L$ , объединение множеств любой своей подсистемы и пересечение множеств любой своей конечной подсистемы [1]. Множество  $L$  с заданной в нем топологией  $\tau$  будем называть топологическим пространством и обозначим через  $E$ . Под топологическим векторным пространством  $E$  будем понимать хаусдорфово топологическое векторное пространство [2], то есть для каждой пары различных точек  $x_1, x_2 \in E$  существуют открытые множества  $G_1, G_2 (x_1 \in G_1, x_2 \in G_2)$ , такие, что  $G_1 \cap G_2 = \emptyset$  [2].

Топология в пространстве  $E$  определяется базисом окрестностей нуля  $E_{\{0\}}$ , такая, что

---

*Адрес для корреспонденции:* Давлатов Ахлиддин Намозович 734003. Республика Таджикистан г. Душанбе, пр. Рудаки 121, ТГПУ. E-mail: ahliddin\_2023@mail.ru

1. для любого  $V \in E_{[0]}$ , существует  $U \in E_{[0]}$ , такое, что  $U + V \subset V$ ;
2. все  $V \in E_{[0]}$  поглощающие и уравновешенные;
3. если  $\alpha \in E$  ( $\alpha \neq 0$ ), то существует  $U \in E_{[0]}$  с  $\alpha \in U$ .

Заметим, что [1, с. 20-21] множество  $M$  точек линейного пространства  $E$  называется:

уравновешенным, если  $\lambda x \in M$  для каждого  $x \in M$  и каждого  $\lambda \in R$ , для которого  $|\lambda| \leq 1$ ; поглощающим, если какова бы ни была точка  $x \in E$ , существует  $k > 0$  такое, что  $x \in \lambda M$ , когда  $|\lambda| \geq k$ ; выпуклым если  $(\lambda x + (1 - \lambda)y) \in M$  для любых  $x, y \in M$  и любого  $\lambda \in (0,1)$ . Топологическое векторное пространство, в котором топология порождается полной инвариантной метрикой, называется пространством Фреше, или  $\Phi$ -пространством [2].

**Определение 1.** Пусть  $B$  банаховое пространство. Тогда ряд

$$\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k \quad (1)$$

называется абсолютно  $p$ -сходящимся, если сходится ряд

$$\sum_{k=1}^{\infty} \|\alpha_k\|^p \quad (1 \leq p < \infty).$$

Множество всех абсолютно  $p$ -сходящихся рядов обозначим через  $\Phi_K$  ( $K$ -пространством Фреше).

**Определение 2** [3]. Величина  $P_A(x)$  называется функционалом Минковского, если

$$P_A(x) = \inf \left\{ r : \frac{x}{r} \in A, r > 0 \right\},$$

где  $A$  – выпуклое тело в пространстве  $E$ , ядро которого содержит точку  $0$ .

**Определение 3.** [3]. В топологическом векторном пространстве  $E$  ряд  $\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k$  называется абсолютно  $p$ -сходящимся ( $0 < p < \infty$ ), если для любого  $A \in E_{[0]}$  ряд

$$\sum_{k=0}^{\infty} (P_A(\alpha_k))^p < \infty,$$

где  $P_A(\alpha_k)$  – функционал Минковского. Под выпуклым телом будем понимать множество  $A$ , ядро которое не пусто, то есть, если  $x, y \in A$ , то соединяющий их отрезок также содержится в  $A$ .

В этой работе рассмотрим критерии абсолютной  $p$ -сходимости рядов вид (1) в топологическом векторном пространстве  $E$ . Заметим, что ранее, аналогичные вопросы в пространстве  $L_p$  рассмотрены в работах С.Б.Стечкина [4], М.Ф.Тимана [5].

**Теорема 1.** Для того, чтобы ряд (1) был абсолютно  $p$ -сходящимся в  $E$ , необходимо и достаточно, чтобы для каждой  $A \in E_{[0]}$  существовала числовая последовательность  $\gamma_k \in \ell_p$  такая, что  $\alpha_k \in A$  для каждой  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

**Доказательство теоремы 1. Необходимость.** Пусть  $A \subset E_{[0]}$  – произвольное выпуклое тело. Обозначим через  $\beta_k = P_A(\alpha_k)$  и заключаем, что  $\{\beta_k\} \in \ell_p$  ( $\beta_k > 0$ ). В силу определения функционала Минковского можно указать последовательность  $\{\gamma_k\}$  такую, что  $\gamma_k - \beta_k < 2^{-k}$ , где  $\gamma_k > \beta_k$ ,  $\alpha_k \in \beta_k A$  с элементами  $\gamma_k$  и  $\alpha_k \in \gamma_k A$ . Так как  $\gamma_k < \frac{1}{2^k} + \beta_k$ , то, применяя неравенство Минковского, при  $p \geq 1$ , получим

$$\sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k^p < \sum_{k=0}^{\infty} \left( \frac{1}{2^k} + \beta_k \right)^p \leq \left\{ \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2^{kp}} \right)^{\frac{1}{p}} + \left( \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p \right)^{\frac{1}{p}} \right\}^p < \infty.$$

Если же  $0 < p < 1$ , то

$$\sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k^p < \sum_{k=0}^{\infty} \left( \frac{1}{2^k} + \beta_k \right)^p \leq \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2^{kp}} + \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p < \infty.$$

Отсюда вытекает, что  $\{\gamma_k\} \in \ell_p$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ).

**Достаточность.** По определению функционала Минковского, если  $\alpha_k \in A$  с элементами  $\gamma_k \in \ell_p$  ( $0 < p < \infty$ ), то имеем

$$\inf\{\alpha_k \in A, k > 0\} \leq \gamma_k \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Поэтому

$$\sum_{k=0}^{\infty} \{P_A(\alpha_k)\}^p \leq \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k^p < \infty.$$

Теорема полностью доказана.

В силу теоремы 1 определение  $p$ -сходимости можно сформулировать в следующем виде

**Определение 4.** Ряд (1) называется абсолютно  $p$ -сходящимся ( $0 < p < \infty$ ), если для каждой  $A \in E_{[0]}$  найдутся  $\alpha_k \in \ell_p$ , такие, что  $\alpha_k \in A$  для всех  $k = 0, 1, 2, \dots$



**Теорема 2.** Множество всех абсолютно-сходящихся рядов ( $0 < p < \infty$ ) является векторным пространством.

**Доказательство. 1)** Пусть  $x = \{\alpha_k\}$ ,  $y = \{\eta_k\}$  и  $x, y \in \ell_p(E)$ . Для  $U \in E_{[0]}$  можно указать такую  $V \in E_{[0]}$ , что  $V + V \subset U$ . Тогда найдутся  $\beta = \{\beta_k\} \in l_p$  и  $\gamma = \{\gamma_k\} \in l_p$ , такие, что  $\alpha_k \in \beta_k V$  и  $\eta_k \in \gamma_k V$  для  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Тогда сумма  $\alpha_k + \eta_k \in \beta_k V + \gamma_k V \subset \rho_k(V + V) \subset \rho_k U$ , где  $\rho_k = \max\{\beta_k, \gamma_k\}$  и  $\{\rho_k\} \in \ell_p$ . Следовательно,  $x + y \in \ell_p(E)$ .

**2)** Пусть  $x = (\alpha_k) \in \ell_p(E)$ ,  $a \in R, a \neq 0$  и  $U \in E_{[0]}$ . (Если  $a = 0$  то  $ax = 0$  и  $ax \in \ell_p(E)$ ).

Найдем  $\beta = (\beta_k) \in \ell_p$ , такую, что  $\alpha_k \in \beta_k U$  для всех  $k$ .

Так как

$$-1 \leq \frac{a}{|a|} \leq 1,$$

то в силу уравновешенности  $U$ ,

$$\frac{a}{|a|} \alpha_k \in \beta_k \frac{a}{|a|} U \subset \beta_k U,$$

или

$$a \alpha_k \in |a| \beta_k U,$$

где

$$\sum_{k=0}^{\infty} (|a| \beta_k)^p = |a|^p \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p < \infty.$$

Из последнего следует, что  $ax \in \ell_p(E)$ . Теорема 2 доказана.

Множество всех абсолютно  $p$ -сходящихся рядов в  $E$  будем обозначать через  $\ell^p(E)$ . Введем в пространство  $\ell^p(E)$  топологию. Пусть в  $E$  задан базис окрестностей нуля  $E_{[0]}$ .

Каждой  $u \in E_{[0]}$  сопоставим множество  $U_{au} = \{x \in \ell_p(E)\}$  и существует такие  $\beta_k \in \ell_p$ , что

$$\sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p \leq a, \quad \alpha_k \in \beta_k u \quad (1 \leq p < \infty).$$

**Теорема 3.** Пространство  $\ell_p(E)$  является топологическим векторным пространством с базисом окрестностей нуля

$$\ell_p(E_{[0]}) = \{U_{au}^p : u \in E_{[0]}\},$$

где  $a$  – положительное рациональное число.

**Доказательство.** Чтобы доказать теорему необходимо показать, что выполняются все три аксиомы фон Неймана.

1. Пусть  $U_{au}^p \in \ell_p(E_{[0]})$ . Для  $u \in E_{[0]}$  найдем такую  $V \in E_{[0]}$ , что  $V+V \in U$ . При  $1 \leq p < \infty$  выберем такое  $b \in \mathbb{Q}_+$  так, чтобы  $2^p b \leq a$ , а в случае  $0 < p < 1$   $2b \leq a$ .

Рассмотрим окрестность нуля  $\mathcal{G}_{bv}$ .

Пусть  $z \in \mathcal{G}_{bv}^p + \mathcal{G}_{bv}^p$ , тогда  $z = x + y$  с  $x, y \in \mathcal{G}_{bv}^p$  т.е.  $\alpha_k \in \gamma_k V$  и  $\eta_k \in \mathcal{G}_k V$ , где

$$\sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k^p \leq b, \quad \sum_{k=0}^{\infty} \mathcal{G}_k^p \leq b.$$

Тогда  $\alpha_k + \eta_k \in \gamma_k V + \mathcal{G}_k V \subset (\gamma_k + \mathcal{G}_k)(V+V) = \beta_k(V+V) \subset \beta_k U$ , где

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p &= \sum_{k=0}^{\infty} (\gamma_k + \mathcal{G}_k)^p \leq \left\{ \left( \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k^p \right)^{\frac{1}{p}} + \left( \sum_{k=0}^{\infty} \mathcal{G}_k^p \right)^{\frac{1}{p}} \right\}^p \leq \\ &\leq \left( b^{\frac{1}{p}} + b^{\frac{1}{p}} \right)^p = \left( 2b^{\frac{1}{p}} \right)^p = 2^p b \leq a \quad (0 < p < 1) \end{aligned}$$

и

$$\sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p = \sum_{k=0}^{\infty} (\gamma_k + \mathcal{G}_k)^p \leq \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k^p + \sum_{k=0}^{\infty} \mathcal{G}_k^p \leq 2b \leq a \quad (0 < p < 1).$$

Отсюда следует, что в обоих случаях

$$\beta_k \in \ell_p^+$$

и

$$\sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p \leq a.$$

Отсюда вытекает, что  $z \in U_{au}^p$ . Значит,  $\mathcal{G}_{bv}^p + \mathcal{G}_{bv}^p \subset U_{au}^p$ .

Первая аксиома выполняется.

2. Докажем, что множество  $U_{au}$  является поглощающим множеством. Действительно, пусть  $x \in \ell_p(E)$ , то есть для каждой  $U \in E_{[0]}$  найдется  $\gamma = \gamma_k \in \ell_p^+$ , такое, что

$$\sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k^p \leq b < \infty$$

и

$$\alpha_k \in \gamma_k U.$$

Полагая  $\beta_k = \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{p}} \gamma_k$ , будем иметь

$$\sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p \leq a$$

и

$$\left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{p}} \alpha_k \in \beta_k U,$$

или

$$\left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{p}} x \in U_{au}^p.$$

Отсюда следует, что  $x \in \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{p}} U_{au}^p$ . Значит, множество  $U_{au}^p$  является поглощающим.

ЦИМ.

Теперь докажем, что  $U_{au}^p$  уравновешенное множество. Пусть  $x \in U_{au}^p$ , то есть

$$\alpha_k \in \beta_k \text{ и } \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p \leq a \quad (|\beta| \leq 1).$$

Тогда, так как множество  $U$  ( $\beta \alpha_k \in \beta \beta_k U \subset \beta_k U$ ) уравновешенное, отсюда вытекает  $\beta x \in U_{au}^p$ . Уравновешенность множества доказана.

3. Поскольку рассматриваем хаусдорфово топологическое векторное пространство, то нам достаточно показать, что если  $E$  хаусдорфово, то и  $\ell_p(E)$  с базисом окрестностей нуля  $\ell_p(E_{[0]})$  тоже хаусдорфово.

Пусть  $x, y \in \ell_p(E)$  ( $x \neq y$ ). Значит, существует число  $k_0$ , такое, что  $\alpha_{k_0} \neq \eta_{k_0}$ ,  $\alpha_{k_0}, \eta_{k_0} \in E$ .

Так как пространство  $E$  хаусдорфово, то существует  $U, V \subset E_{[0]}$ , такие, что

$$(\alpha_{k_0} + U) \cap (\eta_{k_0} + V) = \emptyset. \quad (2)$$

Остается доказать, что и  $(x + U_{lu}^p) \cap (y + V_{lv}^p) = \emptyset$ .

Действительно, если существовал бы элемент  $Z = \{\alpha_k\} \in \ell_p(E)$ , такой, что

$$z = x + U_{lu}^p \text{ и } z = y + V_{lv}^p,$$

то

$$z = x + u, \quad u = \{\omega_k\} \in U_{lu}^p,$$

и

$$z = y + \mathcal{G}, \quad \mathcal{G} = \{\omega_k\} \in V_{lv}^p.$$

Тогда найдутся  $\{\beta_k\}, \{\gamma_k\} \in \ell_p^+$  с

$$\sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^p \leq 1 \text{ и } \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k^p \leq 1,$$

такое, что  $\omega_k \in \beta_k U$  и  $\omega_k \in \gamma_k V$  для всех  $k$ . Тогда

$$\theta_{k_0} = \alpha_{k_0} + \omega_{k_0} \in \alpha_{k_0} + \beta_{k_0} U \subset \alpha_{k_0} + U$$

и

$$\alpha_{k_0} = \eta_{k_0} + \omega_{k_0} \in \eta_{k_0} + \gamma_{k_0} V \subset \eta_{k_0} + V.$$

Этот факт противоречит соотношению (2), поэтому теорема полностью доказана.

**Теорема 4.** Если  $E$  метризуемое топологическое векторное пространство, то множество всех абсолютно-сходящихся рядов в  $E$   $\ell_p(E)$  ( $0 < p < \infty$ ), также является метризуемым.

**Доказательство.** Если  $E$  метризуемое пространство, то в нем найдется счётный базис окрестностей нуля  $E_{[0]}$ . Тогда

$$\ell_p(E_{[0]}) = \{U_{au}^p : u \in E_{[0]}, a \in \mathcal{Q}^+\}$$

является счётным базисом окрестностей нуля в  $\ell_p(E)$ , то есть  $\ell_p(E)$  суть метризуемое пространство. Теорема доказана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнберг М.М. Функциональный анализ. – М.: Просвещение, 1979, 129 с.
2. Шефер Х. Топологические векторные пространства. – М.: Мир, 1971, 359 с.
3. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1989, 624 с.
4. Стечкин С.Б. Об абсолютной сходимости ортогональных рядов. – Мат. сб., 1951, т.29, г 1, с.225-232
5. Тиман М.Ф. Об абсолютной сходимости и суммируемости рядов Фурье. – Сообщ. АН Груз. ССР, 1961, т.26, №6, с. 641-646.

А.Н.ДАВЛАТОВ

### ОИД БА НАЗДИКШАВИИ МУТЛАҚИ ҚАТОРҲО

### ДАР ФАЗОҲОИ ТОПОЛОГӢ

*Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи С.Айнӣ*

Дар майдони ададҳои ҳақиқӣ фазои векторӣ мавриди муҳокима қарор гирифтааст, ки дар зерин мафҳум фазои вектории топологии Хаусдорф фаҳмида мешавад. Дар ин фазо топология дар атрофи базиси нол муайян карда мешавад, ки ҳамаи се аксиомҳои Фон Нейманро қаноат мекунад. Критерияи  $p$ -наздиқшавии мутлақи қаторҳои ададӣ дар фазои вектории топологӣ тадқиқ карда шудааст. Иҷбот карда шудааст, ки маҷмӯи ҳамаи  $p$ -наздиқшавандагии мутлақи ( $0 < p < \infty$ ) қаторҳо фазои векторӣ мебошад.

**Калимаҳои калидӣ:** фазои ҳатгӣ, фазои топологӣ, фазои Фреше, базиси атрофи нулҳо, функционали Минковский, маҷмӯҳои баробарвазн, маҷмӯҳои фурӯбаранда, фазои топологии векторӣ, наздиқшавии мутлақи қатор.

A.N.DAVLATOV

### ON THE CRITERIA OF ABSOLUTE $p$ -CONVERGENCE OF SERIES

### IN A TOPOLOGICAL VECTOR SPACE

*S.Aini Tajik State Pedagogical University*

A vector space is considered over the field of real numbers, which is understood as a Hausdorff topological vector space. In this space, the topology is defined by a neighborhood basis of zero that satisfies all three Von Neumann axioms. Criteria for absolute  $p$ -convergence of series in a topological vector space are found. It is proved that the set of all absolutely  $p$ -convergent ( $0 < p < \infty$ ) series is a vector space.

**Key words:** linear space, topological space, Frechet space, zero neighborhood basis, Minkowski functional, balanced sets, absorbing sets, topological vector space, absolute convergence of series.

#### Сведения об авторе:

Давлатов Ахлиддин Намозович – Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни, соискатель. E-mail: ahliddin\_2023@mail.ru

УДК 519.86

Специальность: 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Р.Н.ОДИНАЕВ, С.Х.МАВЛОНЗОДА

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ В РЕШЕНИИ  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РОГУНСКОЙ ГЭС**

*Таджикский национальный университет*

*Поступила в редакцию 11.10.2023 г.*

*В статье рассматривается применение математического и компьютерного моделирования при решении транспортной задачи на примере строительства Рогунской ГЭС. Развитие транспортной системы грузоперевозок в Республике Таджикистан является важным аспектом экономического развития страны. Целью данной работы является установление методики решения транспортной задачи линейного программирования на примере строительства объектов Рогунской ГЭС. В результате применения данного алгоритма были получены оптимальные планы перевозок для всех транспортных компаний, что позволило снизить затраты и ускорить обеспечение строительными материалами строительных объектов ГЭС.*

**Ключевые слова:** математическое и компьютерное моделирование, линейное программирование, транспортная задача, опорный план, оптимальный план, грузоперевозки, методы решения, метод потенциалов, метод северо-западного угла.

**1. Введение.** В настоящее время математическое моделирование является одним из ключевых инструментов при решении различных задач, в том числе и экономических. Для решения большинства экономических задач используется математическое моделирование, которое позволяет определить цель и тип их решения, а также обеспечивает структуру для единого анализа. Отсюда следует, что экономико-математическое моделирование является основной частью исследования в любой области экономики. Модельное описание экономики с учётом всех её сложностей производится при помощи линейного

---

*Адрес для корреспонденции:* Одинаев Раим Назарович. 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки 17, Таджикский национальный университет. E-mail: [raim\\_odinaev@mail.ru](mailto:raim_odinaev@mail.ru).

программирования. Моделирование позволяет оценить эффективность решения задач и определить оптимальные решения в различных ситуациях.

**2. Анализ научных исследований по решению транспортных задач.** Математическое моделирование транспортной задачи началось ещё в далёких 1930-х годах и было связано с исследованием многих экономических и инженерных проблем. В 1930 году советским экономистом А.Н.Толстым [1] была впервые поставлена транспортная задача линейного программирования, а также Л.В.Канторовичем [2] были предложены общие методы решения и математические исследования задачи линейного программирования.

В 1947 году Джордж Данциг [3] предложил эффективный алгоритм решения данной задачи, основанный на методе потенциалов. Этот метод стал основным для компьютерного решения транспортной задачи. С тех пор математическое моделирование использовалось в различных областях, связанных с логистикой, транспортировкой грузов и распределением ресурсов. Одной из первых задач, которые были решены с помощью математической модели, была задача распределения складских запасов. В дальнейшем появились новые задачи, такие как оптимизация маршрутов доставки товаров, планирование расписаний транспорта и др.

В научных исследованиях достаточно широко представлена задача минимизации транспортных затрат при помощи метода математического моделирования. В работе Л.А.Гладкова и Н.В.Гладковой [4] были рассмотрены новые подходы для решения динамических транспортных задач, которые позволяют улучшить производительность и эффективность системы транспортировки регионов. Это достигается благодаря разработанному алгоритму на основе эволюционных методов и гибридных интеллектуальных моделей. Так же подробно описываются динамические транспортные задачи и задачи маршрутизации автотранспорта с ограничением по времени и их решение с использованием новых методов. В [5] рассматривается транспортная задача на примере работы железнодорожных объектов. Проведён программный расчет этой задачи с модифицированными таблицами. В работе [6] приводится решение транспортной задачи, в которой рассчитывается минимальная стоимость транспортировки груза, используя метод Фогеля.

**3. Транспортная задача линейного программирования.** С развитием вычислительной техники и появлением программных средств математического моделирования, транспортная задача стала решаться даже для огромных объёмов данных за короткие сроки. Современные системы позволяют автоматически рассчитывать оптимальные маршруты и распределять грузы, а также предоставлять информацию о стоимости и временных затратах на исполнение заказа. В настоящее время существует большое количество программных продуктов, позволяющих решать транспортные задачи.

Транспортная задача – это одна из главных задач логистики. Решение данной задачи позволяет оптимизировать расходы на транспортировку грузов и обеспечить оптимальное управление транспортными потоками. Транспортная задача находит применение в различных сферах – от торговли и производства до армии и государственного управления [9-12].

В целом, развитие транспортной системы грузоперевозок в Таджикистане является сложным и многогранным процессом, который требует внедрения новых технологий, улучшения инфраструктуры и повышения квалификации персонала, а также обеспечения безопасности грузоперевозок.

Транспортная задача является задачей линейного программирования, которая заключается в оптимизации распределения ресурсов между несколькими потребителями и поставщиками [7, 8]. Она может быть классифицирована по следующим критериям: транспортная задача по критерию стоимости и транспортная задача по критерию времени [13, 14].

Начальный опорный план транспортной задачи определяется методом северо-западного угла, методом минимального элемента (или наименьшей стоимости) и др. Оптимальный план транспортной задачи определяется методом потенциалов.

**4. Постановка транспортной задачи на примере Рогунской ГЭС.** Рассмотрим конкретную задачу. Объектом исследования выступают 6 транспортных компаний, занимающихся перевозками однородного груза на строительные объекты Рогунской ГЭС. Предметом исследования является построение оптимального плана перевозок с минимальными затратами из 3-х складов на строительные объекты Рогунской ГЭС, которая обслуживается транспортными компаниями.

Проблема заключалась в минимизации расходов на транспортировку однородного груза (металла) для транспортных компаний. Для этого были составлены оптимальные планы перевозки груза, при которых запасы всех поставщиков были вывезены, запросы всех потребителей удовлетворены и затраты были бы минимальными.

По данным, представленным управлением Рогунской ГЭС за 2021 год, на складах «Сомонтаъминот», «Сомонсохтмон» и в г. Вахдат склад «Элок» содержались запасы металла соответственно 2056, 7163 и 3881 тонн. Данный однородный продукт (металл) доставлен на строительные объекты Рогунской ГЭС транспортными компаниями ДАО «Сохтмони асосӣ», ООО «Сохтмон ва нақлиёт ХФ», ООО «Фируз НР», ЗАО «Туннел Садди Ориёно», ЗАО «ЗТМ» г. Норак, ООО «Некзод», соответственно, в объёме 1296, 304, 2057, 5294, 3649 и 200 тонн.

Стоимость перевозки одной тонны однородного продукта (металла) и потребностей из каждого пункта отправления в соответствующие пункты назначения (строительные объекты Рогунской ГЭС) приведена в табл. 1 (данные предоставлены офисом Рогунской ГЭС).



Таблица 1

| Пункты Отправления  | Пункты назначения    |                             |                |                           |                    |              | Запасы |
|---------------------|----------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|--------------------|--------------|--------|
|                     | ДАО "Сохтмони асоси" | ООО "Сохтмон ва нақлиёт ХФ" | ООО "Фируз НР" | ЗАО "Туннел Садди Ориёно" | ЗАО "ЗТМ" г. Норак | ООО "Некзод" |        |
| Сомон таъминот      | 96                   | 97                          | 96             | 95                        | 98                 | 98           | 2056   |
| Сомон сохтмон       | 83                   | 82                          | 90             | 78                        | 81                 | 84           | 7163   |
| г.Ваҳдат склад Элок | 66                   | 65                          | 72             | 67                        | 67                 | 64           | 3881   |
| Потребности         | 1296                 | 304                         | 2357           | 5294                      | 3649               | 200          | 13100  |

Сформулируем математическую модель задачи и составим оптимальный план грузоперевозок из трёх складов металла на строительные объекты Рогунской ГЭС через 6 транспортных компаний для того, чтобы затраты были минимальными.

Пусть  $x_{ij}$  количество груза (металл) тонн, которое перевозится от поставщиков (складов металла) на строительные объекты Рогунской ГЭС (потребитель),  $c_{ij}$  – стоимость перевозки одной тонны металла из складов на строительные объекты Рогунской ГЭС. Тогда математическая модель с минимальными затратами на грузоперевозку имеет вид:

$$\min F(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} . \quad (1)$$

Целевую функцию можно записать в следующем виде:

$$F(x) = 96x_{11} + 97x_{12} + 96x_{13} + 95x_{14} + 98x_{15} + 98x_{16} + 83x_{21} + 82x_{22} + 90x_{23} + 78x_{24} + 81x_{25} + 84x_{26} + 66x_{31} + 65x_{32} + 72x_{33} + 67x_{34} + 67x_{35} + 64x_{36}.$$

По запасам металла, находящимся на складах

$$\sum_{j=1}^6 x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} = 2056$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} = 7163$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} = 3881.$$

По потребностям строительных объектов Рогунской ГЭС

$$\sum_{i=1}^3 x_{ij} = b_j, \quad j = \overline{1, 6} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
x_{11} + x_{21} + x_{31} &= 1296 \\
x_{12} + x_{22} + x_{32} &= 304 \\
x_{13} + x_{23} + x_{33} &= 2357 \\
x_{14} + x_{24} + x_{34} &= 5294 \\
x_{15} + x_{25} + x_{35} &= 3649 \\
x_{16} + x_{26} + x_{36} &= 200.
\end{aligned}$$

Суммарные запасы всех складов составляют:

$$\sum_{i=1}^m a_i = 2056 + 7163 + 3881 = 13100.$$

Суммарные потребности всех строительных объектов составляют:

$$\sum_{j=1}^n b_j = 1296 + 304 + 2357 + 5294 + 3649 + 200 = 13100.$$

Отсюда следует, что сумма грузов у поставщиков (склады металла) равна общей сумме потребностей в пунктах назначения (Рогунской ГЭС), то модель транспортной задачи называется сбалансированной (закрытой), то есть

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j. \quad (4)$$

Условие (4) является необходимым и достаточным для разрешимости транспортной задачи.

Используя метод северо-западного угла, находим начальный опорный план, который приведён в табл. 2.

Таблица 2

| Пункты Отправления | Пункты назначения    |                             |                |                           |                    |              | Запасы |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|--------------------|--------------|--------|
|                    | ДАО "Сохтмони асосӣ" | ООО "Сохтмон ва нақлиёт ХФ" | ООО "Фируз НР" | ЗАО "Туннел Садди Ориёно" | ЗАО "ЗТМ" г. Норақ | ООО "Некзод" |        |
| Сомон таъминот     | 96<br>1296           | 97<br>304                   | 96<br>456      | 95<br>0                   | 98<br>0            | 98<br>0      | 2056   |
| Сомон сохтмон      | 83<br>0              | 82<br>0                     | 90<br>1901     | 78<br>5262                | 81<br>0            | 84<br>0      | 7163   |
| Ш.Ваҳдат Элок      | 66<br>0              | 65<br>0                     | 72<br>0        | 67<br>32                  | 67<br>3649         | 64<br>200    | 3881   |
| Потребности        | 1296                 | 304                         | 2357           | 5294                      | 3649               | 200          | 13100  |

$$\begin{aligned}
F(x) &= 96 * 1296 + 97 * 304 + 96 * 456 + 90 * 1901 + 78 * 5262 + \\
&+ 67 * 32 + 67 * 3649 + 64 * 200 = 1038633 \text{ (т/сомон)}.
\end{aligned}$$

При таком распределении груза, затраты на перевозку составят 1038633(т/сомон). Далее, с помощью метода потенциалов этот план проверяется на оптимальность. Построим систему потенциалов, которые соответствуют первому опорному решению. Для этого будем решать систему уравнений  $v_j - u_i = c_{ij}$  при  $x_{ij} > 0$  (то есть занятые клетки).

$$v_1 - u_1 = 96; v_2 - u_1 = 97; v_3 - u_1 = 96; v_3 - u_2 = 90;$$

$$v_4 - u_2 = 78; v_4 - u_3 = 67; v_5 - u_3 = 67; v_6 - u_3 = 64;$$

$$v_1 = 96; v_2 = 97; v_3 = 96; u_2 = 6; v_4 = 84; u_3 = 17; v_5 = 84; v_6 = 81.$$

Проверим выполнение условия оптимальности для свободных клеток таблицы. Для этого вычисляют оценки для всех свободных клеток по формулам  $\Delta_{ij} = v_j - u_i - c_{ij}$ . Если для всех свободных клеток  $\Delta_{ij} \leq 0$ , то вычисляют значение целевой функции, и решение задачи заканчивается, так как полученное решение является оптимальным. Если же имеется хотя бы одна клетка с положительной оценкой, опорное решение не является оптимальным.

$$\Delta_{14} = 84 - 0 - 95 = -11; \Delta_{15} = 84 - 0 - 98 = -14; \Delta_{16} = 81 - 0 - 98 = -17; \Delta_{21} = 96 - 6 - 83 = 7;$$

$$\Delta_{22} = 97 - 6 - 82 = 9; \Delta_{25} = 84 - 6 - 81 = -3; \Delta_{26} = 97 - 6 - 82 = 9; \Delta_{31} = 96 - 17 - 66 = 13;$$

$$\Delta_{32} = 97 - 17 - 65 = 15; \Delta_{33} = 96 - 17 - 72 = 7.$$

Поскольку среди значений оценок существует положительное число, то полученное решение не является оптимальным. Поэтому для нахождения оптимального решения необходимо перейти к новому базисному решению, в котором значение целевой функции будет меньше. Среди найденных оценок выбираем наибольшую положительную оценку  $\Delta_{ij} > 0$ , в этом случае  $\Delta_{32} = 15$ . Далее построим цикл, в который входит выбранная клетка и часть клеток, занятых опорным решением. В клетках цикла расставляют поочередно знаки «+» и «-», начиная с «+» в клетке с наибольшей положительной оценкой.

Выбираем наименьшее число, находящееся в минусовых клетках, затем это число добавляем в плюсовые клетки и вычитаем из минусовых клеток.

Таблица 3

| Пункты Отправления | Пункты назначения    |                             |                      |                           |                      |              | Запасы |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|--------------|--------|
|                    | ДАО "Сохтмони асосӣ" | ООО "Сохтмон ва наклиёт ХФ" | ООО "Фирӯз НР"       | ЗАО "Туннел Садди Ориёно" | ЗАО "ЗТМ" г. Норақ   | ООО "Некзод" |        |
| Сомон таъминот     | 96<br>1296           | 97 $\ominus$<br>272         | 96 $\oplus$<br>488   | 95<br>0                   | 98<br>0              | 98<br>0      | 2056   |
| Сомон сохтмон      | 83<br>0              | 82<br>0                     | 90 $\ominus$<br>1869 | 78<br>5294                | 81 $\oplus$<br>0     | 84<br>0      | 7163   |
| Ш.Ваҳдат<br>Элок   | 66<br>0              | 65 $\oplus$<br>32           | 72<br>0              | 67<br>0                   | 67 $\ominus$<br>3649 | 64<br>200    | 3881   |
| Потребности        | 1296                 | 304                         | 2357                 | 5294                      | 3649                 | 200          | 13100  |

$$F(x) = 96*1296 + 97*272 + 90*1869 + 78*5294 + 65*32 + 67*3649 + 64*200 = 1038153.$$

При таком распределении груза, затраты на перевозку составят 1038153 (т/сомон). Далее, с помощью метода потенциалов, второй опорный план проверяется на оптимальность. Используя систему уравнений  $v_j - u_i = c_{ij}$  при  $x_{ij} > 0$  (то есть занятые клетки), находим значение потенциалов  $v_j$  и  $u_i$ .

$$v_1 - u_1 = 96; v_2 - u_1 = 97; v_3 - u_1 = 96; v_3 - u_2 = 90;$$

$$v_4 - u_2 = 78; v_5 - u_3 = 67; v_6 - u_3 = 64; v_6 - u_3 = 64;$$

$$v_1 = 96; v_2 = 97; v_3 = 96; u_2 = 6; v_4 = 84; u_3 = 32; v_5 = 99; v_6 = 96.$$

Теперь проверим выполнение условия оптимальности для свободных клеток таблицы по формуле  $\Delta_{ij} = v_j - u_i - c_{ij}$ .

$$\Delta_{14} = 84 - 0 - 95 = -11; \Delta_{15} = 99 - 0 - 98 = 1; \Delta_{16} = 96 - 0 - 98 = -2; \Delta_{21} = 96 - 6 - 83 = 7;$$

$$\Delta_{22} = 97 - 6 - 82 = 9; \Delta_{25} = 99 - 6 - 81 = 12; \Delta_{26} = 96 - 6 - 84 = 6; \Delta_{31} = 96 - 32 - 66 = -2;$$

$$\Delta_{33} = 96 - 32 - 72 = -8; \Delta_{34} = 84 - 32 - 67 = -15.$$

Опорный план не является оптимальным, так как среди найденных оценок существует положительная оценка. Выбираем наибольшую положительную оценку среди  $\Delta_{ij} > 0$ , в этом случае  $\Delta_{25} = 12$ . В табл. 4, начиная с клетки  $\Delta_{25}$ , построим цикл перераспределения груза.

Таблица 4

| Пункты Отправления | Пункты назначения    |                             |                      |                           |                      |              | Запасы |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|--------------|--------|
|                    | ДАО "Сохтмони асосӣ" | ООО "Сохтмон ва нақлиёт ХФ" | ООО "Фируз НР"       | ООО "Туннел Садли Ориёно" | ЗАО "ЗТМ" г. Норақ   | ООО "Некзод" |        |
| Сомон таъминот     | 96 $\ominus$<br>1296 | 97<br>0                     | 96 $\oplus$<br>760   | 95<br>0                   | 98<br>0              | 98<br>0      | 2056   |
| Сомон сохтмон      | 83<br>0              | 82<br>0                     | 90 $\ominus$<br>1597 | 78<br>5294                | 81 $\oplus$<br>272   | 84<br>0      | 7163   |
| Ш.Ваҳдат Элок      | 66 $\oplus$<br>0     | 65<br>304                   | 72<br>0              | 67<br>0                   | 67 $\ominus$<br>3377 | 64<br>200    | 3881   |
| Потребности        | 1296                 | 304                         | 2357                 | 5294                      | 3649                 | 200          | 13100  |

$$F(x) = 96*1296 + 96*760 + 90*1597 + 78*5294 + 81*272 + 65*304 + 67*3377 = 1034889.$$

При таком распределении груза, затраты на перевозку металла составят 1034889 (т/сомон). Далее, с помощью метода потенциалов, третий опорный план проверяется на оптимальность.

Используя систему уравнений  $v_j - u_i = c_{ij}$  при  $x_{ij} > 0$  (то есть занятые клетки), находим значение потенциалов  $v_j$  и  $u_i$ .

$$v_1 - u_1 = 96; v_3 - u_1 = 96; v_3 - u_2 = 90; v_4 - u_2 = 78;$$

$$v_5 - u_2 = 81; v_2 - u_3 = 65; v_5 - u_3 = 67; v_6 - u_3 = 64;$$

$$v_1 = 96; v_3 = 96; u_2 = 6; v_4 = 84; v_5 = 87; u_3 = 20 \quad v_2 = 85; v_6 = 84.$$

Проверим условия оптимальности для свободных клеток табл. 4 по формуле  $\Delta_{ij} = v_j - u_i - c_{ij}$ .

$$\Delta_{12} = 85 - 0 - 97 = -12; \Delta_{14} = 84 - 0 - 95 = -11; \Delta_{15} = 87 - 0 - 98 = -11; \Delta_{16} = 84 - 0 - 98 = -14;$$

$$\Delta_{21} = 96 - 6 - 83 = 7; \Delta_{22} = 85 - 6 - 82 = -3; \Delta_{26} = 84 - 6 - 84 = -6; \Delta_{31} = 96 - 20 - 66 = |10|;$$

$$\Delta_{33} = 96 - 20 - 72 = 4; \Delta_{34} = 84 - 20 - 67 = -3.$$

Третий опорный план не является оптимальным, так как среди  $\Delta_{ij}$  существует положительная оценка. Выбираем наибольшую положительную оценку, в этом случае  $\Delta_{31} = 10$ . В следующей табл. 5, начиная с клетки  $\Delta_{31}$ , построим цикл перераспределения груза.

Таблица 5

| Пункты Отправления | Пункты назначения   |                             |                     |                           |                      |              | Запасы |
|--------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|--------------|--------|
|                    | ДАО "Сохтмони асоя" | ООО "Сохтмон ва наклиёт ХФ" | ООО "Фируз НР"      | ООО "Туннел Садди Ориёно" | ЗАО "ЗТМ" г. Нораг   | ООО "Некзод" |        |
| Сомон таьминот     | 96<br>0             | 97<br>0                     | 96<br>2056          | 95<br>0                   | 98<br>0              | 98<br>0      | 2056   |
| Сомон сохтмон      | 83<br>0             | 82<br>0                     | 90 $\ominus$<br>301 | 78<br>5294                | 81 $\oplus$<br>1568  | 84<br>0      | 7163   |
| г.Вахдаг Элок      | 66<br>1296          | 65<br>304                   | 72 $\oplus$<br>0    | 67<br>0                   | 67 $\ominus$<br>2081 | 64<br>200    | 3881   |
| Потребности        | 1296                | 304                         | 2357                | 5294                      | 3649                 | 200          | 13100  |

$$F(x) = 96 * 2056 + 90 * 301 + 78 * 5294 + 81 * 1568 + 66 * 1296 + 65 * 304 +$$

$$+ 67 * 2081 + 64 * 200 = 1021929.$$

Для данного опорного плана, при таком распределении груза, минимальная стоимость перевозки металла составит 1021929(т/сомон). Далее, с помощью метода потенциалов четвёртый опорный план проверяется на оптимальность.

$$v_3 - u_1 = 96; v_3 - u_2 = 90; v_4 - u_2 = 78; v_5 - u_2 = 81;$$

$$v_1 - u_3 = 66; v_2 - u_3 = 65; v_5 - u_3 = 67; v_6 - u_3 = 64;$$

$$v_3 = 96; u_2 = 6; v_4 = 84; v_5 = 87; u_3 = 20; v_1 = 86 \quad v_2 = 85; v_6 = 84.$$

Проверим условия оптимальности для свободных клеток табл. 5 по формуле  $\Delta_{ij} = v_j - u_i - c_{ij}$ .

$$\begin{aligned} \Delta_{11} &= 86 - 0 - 96 = -10; \Delta_{12} = 85 - 0 - 97 = -12; \Delta_{14} = 84 - 0 - 95 = -11; \Delta_{15} = 87 - 0 - 98 = -11; \\ \Delta_{16} &= 84 - 0 - 98 = -4; \Delta_{21} = 85 - 6 - 83 = -4; \Delta_{22} = 85 - 6 - 82 = -3; \Delta_{26} = 84 - 20 - 67 = -6; \\ \Delta_{33} &= 96 - 20 - 72 = 4; \Delta_{34} = 84 - 20 - 67 = -3. \end{aligned}$$

Заметим, что среди  $\Delta_{ij}$  существует положительная оценка, то есть опорный план не является оптимальным. Наибольшая положительная оценка в этом случае  $\Delta_{33} = 4$ , и с этой клетки построим цикл перераспределения груза (табл. 6).

Таблица 6

| Пункты Отправления | Пункты назначения    |                             |                |                           |                    |              | Запасы |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|--------------------|--------------|--------|
|                    | ДАО "Сохтмони асосй" | ООО "Сохтмон ва наклиёт ХФ" | ООО "Фируз НР" | ООО "Туннел Садди Ориёно" | ЗАО "ЗТМ" г. Норак | ООО "Некзод" |        |
| Сомон таъминот     | 96<br>0              | 97<br>0                     | 96<br>2056     | 95<br>0                   | 98<br>0            | 98<br>0      | 2056   |
| Сомон сохтмон      | 83<br>0              | 82<br>0                     | 90<br>0        | 78<br>5294                | 81<br>1869         | 84<br>0      | 7163   |
| Ш.Ваҳдат Элок      | 66<br>1296           | 65<br>304                   | 72<br>301      | 67<br>0                   | 67<br>1780         | 64<br>200    | 3881   |
| Потребности        | 1296                 | 304                         | 2357           | 5294                      | 3649               | 200          | 13100  |

$$\begin{aligned} F(x) &= 96 * 2056 + 78 * 5294 + 81 * 1869 + 66 * 1296 + 65 * 304 + \\ &+ 72 * 301 + 67 * 1780 + 64 * 200 = 1020725. \end{aligned}$$

При таком распределении груза, минимальная стоимость перевозки металла составит 1020725 (т/сомон). Аналогично, используя метод потенциалов, пятый опорный план проверяется на оптимальность.

$$\begin{aligned} v_1 - u_1 &= 96; v_4 - u_2 = 78; v_5 - u_2 = 81; v_1 - u_3 = 66; \\ v_2 - u_3 &= 65; v_3 - u_3 = 72; v_5 - u_3 = 67; v_6 - u_3 = 64; \end{aligned}$$

$$v_1 = 96; v_4 = 94; u_2 = 16; u_3 = 3; v_2 = 95; v_3 = 102; v_5 = 97; v_6 = 94.$$

Проверим условия оптимальности пятого опорного плана.

$$\begin{aligned} \Delta_{11} &= 96 - 0 - 96 = 0; \Delta_{12} = 95 - 0 - 97 = -2; \Delta_{14} = 94 - 0 - 95 = -1; \Delta_{15} = 97 - 0 - 98 = -1; \\ \Delta_{16} &= 94 - 0 - 98 = -4; \Delta_{21} = 96 - 16 - 88 = -3; \Delta_{22} = 95 - 16 - 82 = -3; \Delta_{23} = 102 - 16 - 90 = -4; \\ \Delta_{26} &= 94 - 16 - 84 = -6; \Delta_{34} = 94 - 30 - 67 = -3. \end{aligned}$$

Данный опорный план является оптимальным, так как среди оценок  $\Delta_{ij}$  нет положительных оценок и, таким образом, минимальная стоимость перевозки металла будет составлять 1020725 (т/сомон).

Исходя из анализа оптимального плана, делаются выводы: – из склада «Элок» г. Вахдат следует отправить на строительные объекты Рогунской ГЭС 1296 тонн металла транспортной компанией ДАО «Сохтмони асоси», 304 тонн транспортной компанией ООО «Сохтмон ва нақлиёт ХФ», 301 тонну металла транспортной компанией ООО "Фируз НР", 1780 тонн металла транспортной компанией ЗАО "ЗТМ" г. Норак и 200 тонн металла транспортной компанией ООО «Некзод». Со склада «Сомон сохтмон» следует отправить 5294 тонн металла транспортной компанией ЗАО ШМ "Туннел Садди Ориёно" и 1869 тонн металла транспортной компанией ЗАО "ЗТМ" г. Норак. Со склада «Сомон таъминот» следует отправить 2056 тонн металла транспортной компанией ООО «Фируз НР».

**5. Результаты компьютерного моделирования.** В этом разделе приведены результаты компьютерной программы разработанной на языке программирования С++, которая является важным инструментом для научных исследований в различных областях науки.

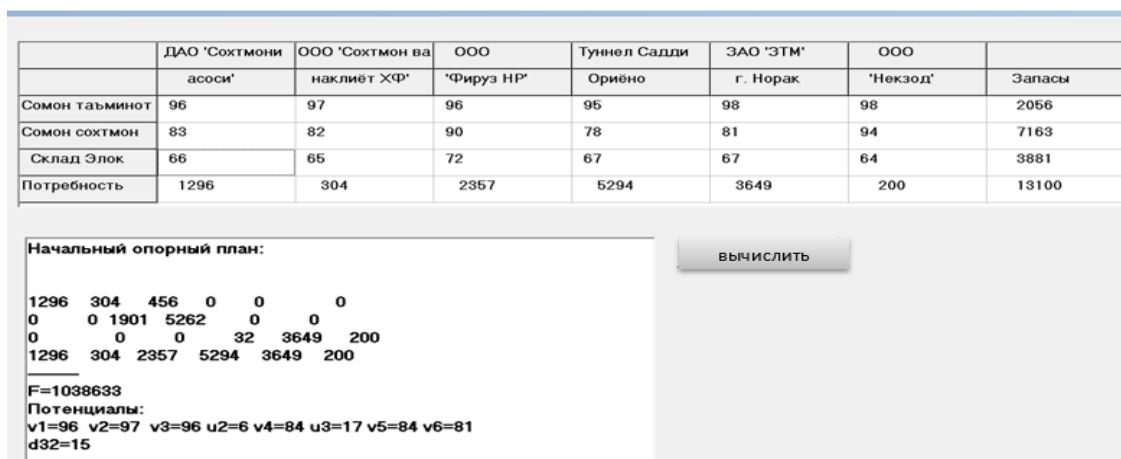


Рис. 1. Скриншот первого опорного плана.

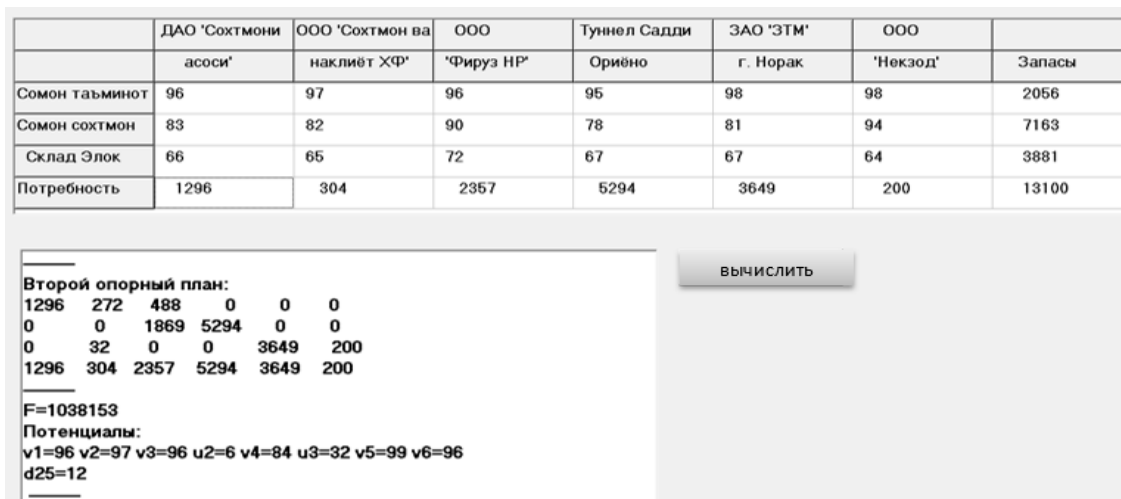


Рис. 2. Скриншот второго опорного плана.

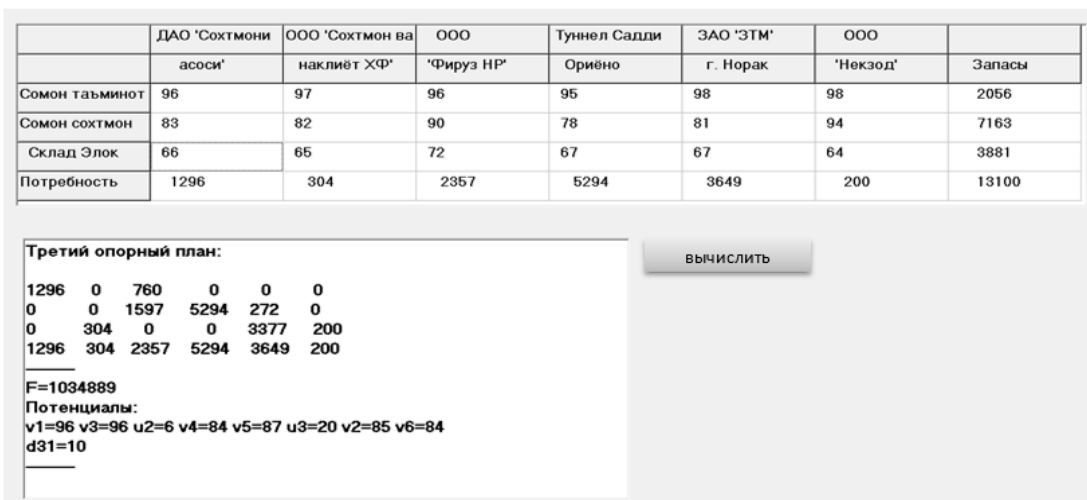


Рис. 3. Скриншот третьего опорного плана.

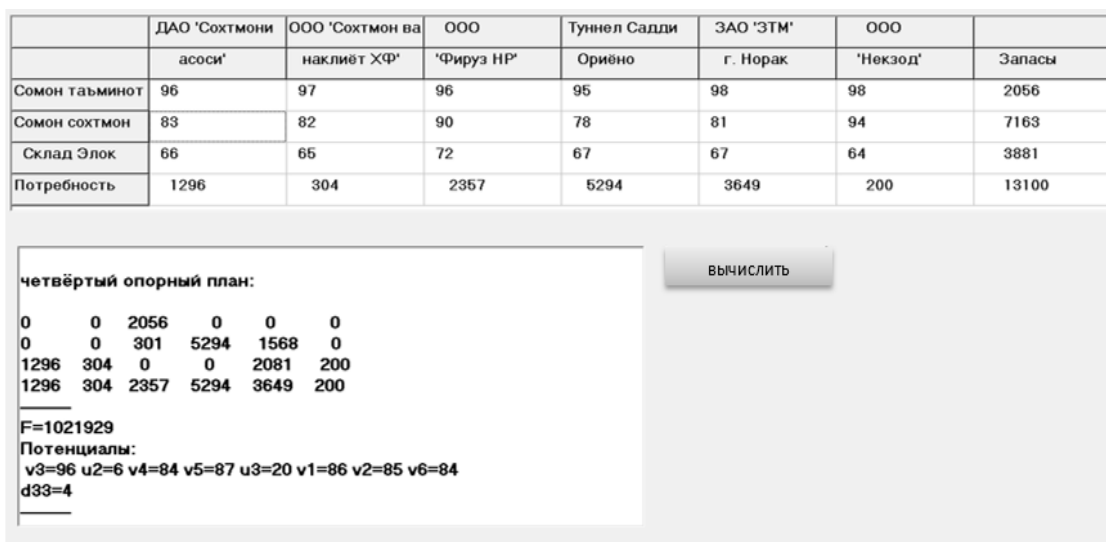


Рис. 4. Скриншот четвёртого опорного плана.

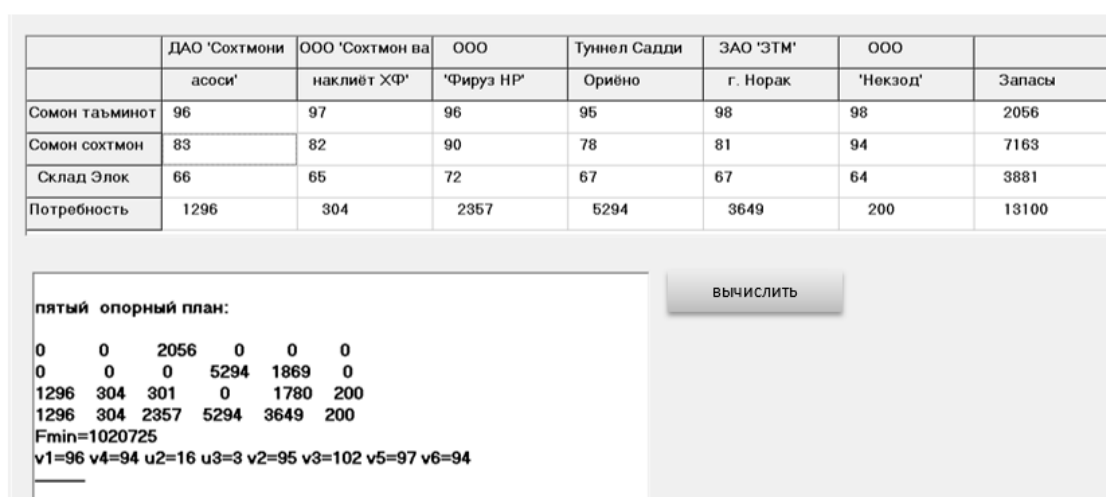


Рис. 5. Скриншот пятого опорного плана.



**6. Заключение.** В данной статье было проведено исследование транспортной задачи перевозки металла на строительные объекты Рогунской ГЭС. Были описаны математические модели, позволяющие определить оптимальный план перевозок металла, а также разработана компьютерная программа для решения транспортной задачи. Таким образом, математическое и компьютерное моделирование транспортной задачи позволяет эффективно решать экономические задачи. Применение данного метода на примере Рогунской ГЭС доказало его эффективность и значительно упростило процесс разработки оптимальной стратегии транспортировки материалов и оборудования на строительные объекты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Толстой А. Методы устранения нерациональных перевозок при составлении оперативных планов. – М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1941, 102 с.
2. Канторович Л.В. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. Серия: Академия наук СССР. – Изд-во Академии наук СССР, 1959, 344 с.
3. Данциг Дж. Линейное программирование, его обобщения и применения. Дж. Данциг. – М.: Прогресс, 1966, 602 с.
4. Гладков Л.А., Гладкова Н.В. Особенности и новые подходы к решению динамических транспортных задач с ограничением по времени. - Известия ЮФУ РФ. Технические науки. 2014, с.178-187.
5. Васильев О.В., Леденева Т.М. Транспортная задача и оптимизация грузоперевозок [Текст] – Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011, т. 7, № 11, с. 82-84.
6. Цыплакова О.Н., Цысь Ю.В., Кобылина А.В. Транспортная задача и её применение в решении экономических задач. Современные наукоемкие технологии. 2014, № 5-2, с. 178-180.
7. Зайченко Ю.П. Исследование операций. – Киев: Слово, 2003, 688с.
8. Таха Х. Введение в исследование операций. – М.: Мир, 1985, 248с.
9. Odinaev R.N., Mavlonzoda S.H. Mathematical model of cargo transportation of the republic of Tajikistan at the Premier Rogunskaya HPP using linear programming methods. – Вестник Таджикского национального университета. 2020, No. 4, pp. 5-15. – DOI 10.51884/2413-452X\_2020\_4\_5. – EDN MIDUWP.
10. Бобоеров Ш.К., Одинаев Р.Н., Шерматов Н.Ш. Применение теории гипотез при решении практических задач. – Душанбе: Эр-граф, 2019, 108 с. – ISBN 978-99975-78-55-6. – EDN YUVHNO.
11. Юниси Ю. Одинаев О. Методы оптимизации. – Душанбе: Таджикский национальный университет, 2014, 179 с. – EDN WUMYKR.
12. Шерматов Н.Ш. Одинаев Р.Н., Нарзуллоев П.Л. Применение статистических методов в решении прикладных задач. – Душанбе: ЭР-Граф, 2020, 96 с. – ISBN 978-99975-889-8-2. – EDN BPHXSE.
13. Одинаев, Р.Н. Методы оптимизации. – Душанбе: Донишгоҳи миллии Тоҷикистон, 2021, 246 p. – EDN KXJUUM.
14. Одинаев Р.Н., Раимзода Ф., Раимзода Ф.Р., Шерматов Н.Ш. Методы оптимизации в примерах и задачах. Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. – Душанбе: Эр-граф, 2020, 148 с. – ISBN 9879997590886. – EDN LYAGOE.

Р.Н.ОДИНАЕВ, С.Ҳ. МАВЛОНЗОДА

**МОДЕЛСОЗИИ МАТЕМАТИКӢ ВА КОМПЮТЕРИИ МАСЪАЛАИ  
НАҚЛИЁТ ВА ИСТИФОДАИ ОН ДАР ҲАЛЛИ МАСЪАЛАҲОИ  
ИҚТИСОДИИ НБО РОҒУН**

*Донишгоҳи миллии Тоҷикистон*

Дар ин мақола истифодаи моделсозии математикӣ ва компютерӣ дар ҳалли масъалаи нақлиёт дар мисоли сохтмони НБО Роғун баррасӣ мешавад. Инкишофи системаи нақлиёти боркашонии Ҷумҳурии Тоҷикистон чихати муҳими тараққиёти иқтисодии мамлақат мебошад. Мақсади ин кор дар мисоли сохтмони иншоотҳои ГЭС-и Роғун муқаррар намудани методологияи ҳалли проблемаи нақлиёти барномасозии ҳатист. Дар натиҷаи истифодаи алгоритми мазкур нақшаи оптималии кашонидани борҳо барои ҳамаи ширкатҳои нақлиётӣ ба даст оварда шуданд, ки имкон дод, ки хароҷотро коҳиш диҳанд ва таъмини маводи сохтмониро ба объектҳои сохтмони ГЭС суръат бахшанд.

**Калимаҳои калидӣ:** моделсозии математики ва компютерӣ, барномасозии ҳатӣ, масъалаи нақлиёт, нақшаи тақягоҳӣ, нақшаи оптималӣ, интиқоли бор, усулҳои ҳал, усули потенциали, усули кунҷи шимолу ғарб.

R.N.ODINAEV, S.H.MAVLONZODA

**MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF THE TRANSPORT  
PROBLEM AND ITS APPLICATION IN SOLVING ECONOMIC PROBLEMS  
OF THE ROGUN HPP**

*Tajik National University*

This article discusses the use of mathematical and computer modeling in solving the transport problem on the example of the construction of the Rogun HPP. The development of the transport system of cargo transportation in the Republic of Tajikistan is an important aspect of the economic development of the country. The purpose of this work is to establish a methodology for solving the transport problem of linear programming on the example of the construction of Rogun HPP facilities. As a result of applying this algorithm, optimal transportation plans were obtained for all transport companies, which made it possible to reduce costs and speed up the provision of building materials to HPP construction sites.

**Key words:** mathematical and computer modeling, linear programming, transport problem, basic plan, optimal plan, cargo transportation, solution methods, potential method, northwest corner method.

**Сведения об авторах:**

**Одинаев Раим Назарович** – доктор физико-математических наук, Таджикский национальный университет, зав. кафедрой ”Математика и компьютерное моделирование”.  
E-mail: raim\_odinaev@mail.ru.

**Мавлонзода Сафарали Хикматулло** – Таджикский национальный университет, ассистент кафедры “Информатика”. E-mail: mavlonov\_s96@mail.ru.

УДК 002.6

Специальность: 2.3.8 – Информатика и информационные процессы

М.Ф.РАХИМОВ, Ф.С.КОМИЛИЁН\*

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МОНОЛИТНЫХ И МИКРОСЕРВИСНЫХ АРХИТЕКТУР

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт математики им. А.Джураева НАН Таджикистана,  
\*Таджикский национальный университет*

*Поступила в редакцию 27.12.2023 г.*

*В данной статье освещаются стратегии и методы перехода от монолитной архитектуры к микросервисам в программном обеспечении. Описываются преимущества и ограничения монолитных систем, а также преимущества микросервисных систем. Приводится обзор технических и организационных аспектов внедрения микросервисов в существующую инфраструктуру.*

**Ключевые слова:** монолитная архитектура, микросервисная архитектура, программное обеспечение, разработка, развертывание, поддержка, гибкость, надежность, управляемость, масштабируемость, производительность.

**Введение.** Анализ характеристик монолитных и микросервисных архитектур является важной задачей в области разработки программного обеспечения (ПО). Монолитная архитектура представляет собой традиционный подход к построению приложений, при котором весь функционал приложения находится в одном цельном блоке. С другой стороны, микросервисная архитектура предполагает разделение функционала на отдельные независимые сервисы, взаимодействующие между собой посредством API (Application Programming Interface – Интерфейс прикладного программирования) [1].

В данном контексте анализ включает в себя оценку таких характеристик, как масштабируемость, гибкость, управляемость, производительность и надежность обеих

---

*Адрес для корреспонденции: Рахимов Манучехр Фарходович. 734025, Таджикистан, Душанбе, пр. Рудаки, 33, НАН Таджикистана. E-mail: manucher5160@gmail.com. Комилиён Файзали Саъдулло. 734025, Таджикистан, Душанбе, пр. Рудаки, 17, Таджикский национальный университет. E-mail: komfaiz@mail.ru.*

архитектур. Также, учитывая современные вызовы, необходимо провести сравнительный анализ затрат на разработку, развертывание и поддержку систем на основе монолитной и микросервисной архитектур [1].

В условиях Республики Таджикистан анализ монолитных и микросервисных архитектур может быть особенно важен для разработки программного обеспечения в различных отраслях, таких как финансы, здравоохранение, государственное управление, наука, образование и другие. Важно учитывать специфические особенности региона, такие как доступность интернета, уровень технической поддержки и наличие квалифицированных специалистов [2-7].

Монолитная архитектура может быть предпочтительной в случаях, когда требуется быстрое развертывание и простота управления приложением. Однако, микросервисная архитектура может быть более гибкой и масштабируемой, что особенно важно для больших и сложных систем.

С учетом экономических и технических факторов, а также специфики отрасли, рекомендуется провести детальный анализ требований проекта и возможностей ресурсов, чтобы определить наиболее подходящую архитектуру для конкретной ситуации в Республике Таджикистан [2-7].

Задачей настоящего исследования является выявление преимуществ и недостатков каждой из архитектур с целью определения наиболее подходящего варианта для конкретного проекта или организации.

**Анализ особенностей монолитных систем.** В современном мире технологий и разработки программного обеспечения требования к системам становятся все более разнообразными и динамичными. Монолитные системы, которые традиционно представляли собой компактные, единые приложения, имеют свои ограничения в свете современных требований к масштабируемости, гибкости и поддержке новых технологий.

Монолитная архитектура представляет собой тип архитектуры программного обеспечения, где все компоненты и функциональность приложения интегрированы в единую единицу, обычно как один большой модуль, то есть весь функционал приложения концентрируется в одном цельном блоке кода, что может быть удобным на ранних стадиях разработки. Однако с ростом размера и сложности таких систем возникают значительные проблемы. Ограниченная масштабируемость монолитов приводит к трудностям в поддержании высокой производительности при увеличении объема данных или нагрузки. Внесение изменений или добавление нового функционала становится сложным и рискованным процессом из-за взаимосвязанности компонентов внутри монолита. Эти факторы замедляют инновации и гибкость развития системы, что не соответствует современным требованиям рынка [8].

Анализ текущей монолитной системы играет важную роль в понимании проблем, с которыми сталкиваются разработчики и бизнес в процессе развития и поддержки системы.

В контексте данной проблемы микросервисная архитектура представляет собой перспективное решение. Она основана на идее разделения приложения на независимые,

автономные компоненты – микросервисы, каждый из которых выполняет ограниченное количество функций. Это позволяет разработчикам работать над каждым компонентом отдельно, обеспечивая более гибкую масштабируемость и возможность быстрого развертывания изменений. Микросервисы могут быть разработаны с использованием различных технологий и языков программирования, что обеспечивает возможность интеграции новых технологий без необходимости изменения всей системы.

Переход от монолитной архитектуры к микросервисной представляет собой не только техническое обновление, но и стратегический шаг, который может существенно улучшить масштабируемость, гибкость разработки и способствовать успешной адаптации к современным требованиям рынка [9].

Ниже представлено (рис. 1) описание особенностей и типичных проблем монолитных систем, что может послужить мотивацией для перехода к микросервисной архитектуре [10-16].

Основные характеристики монолитных систем включают:

**а) Преимущества:**

- *простота разработки.* Для небольших и начинающих проектов монолитная архитектура может быть проще в разработке и обслуживании;

- *простота тестирования.* Модули приложения находятся в одном месте, что упрощает тестирование и отладку;

- *простота запуска.* Все компоненты находятся в одной кодовой базе, что упрощает развертывание и запуск.

**б) Проблемы и ограничения:**

- *сильная связность компонентов.* Различные функции и компоненты приложения тесно связаны друг с другом, что может привести к сложностям при добавлении нового функционала из-за межзависимостей;

- *затрудненные изменения.* Внесение изменений в монолитную систему может быть сложным и рискованным из-за взаимосвязей компонентов;

- *сложность поддержки.* Изменения в функционале или добавление нового требуют модификации единого блока кода, что может быть сложно, рискованно и времязатратно, а также может вызывать сбои из-за неожиданных взаимосвязей;

- *сложность масштабирования.* При увеличении объема данных или нагрузки, а также размеров приложения монолитная система может столкнуться с проблемами масштабируемости, так как не всегда возможно масштабировать только определенные части системы;

- *ограниченная гибкость.* Сложность добавления новых технологий или языков программирования в систему из-за единого кодового стека;



**Рис. 1.** Графическое представление особенностей и типичных проблем монолитной системы.

- *недостаточная инновационность.* Монолиты часто страдают от ограничений в гибкости, замедляя инновации из-за сложности внесения изменений и интеграции новых технологий;

- *однородность технологий и языков.* Обычно монолитные системы используют один язык программирования и технологический стек, что может ограничивать возможности использования новых инструментов и технологий.

Это основные характеристики (преимущества и недостатки) монолитной системы, которые определяют ее уникальные особенности и особенности разработки, развертывания и поддержки, и которые следует учитывать при выборе архитектуры для проекта.

Анализ ограничений и проблем монолитной системы в контексте масштабируемости, сложности изменений и поддержки обосновывает необходимость и целесообразность перехода к микросервисной архитектуре для повышения гибкости, масштабируемости и способности системы к инновациям.

**Анализ особенностей микросервисных систем.** Микросервисная архитектура – это подход к разработке программного обеспечения, в котором большое приложение разбивается на маленькие автономные сервисы (микросервисы), каждый из которых выполняет определенную функцию. Данная архитектура предоставляет ряд преимуществ, но также требует хорошей организации и управления для успешной реализации (рис. 2).



Рис. 2. Графическое представление преимуществ и недостатков микросервисной архитектуры.



Эти характеристики делают микросервисную архитектуру привлекательной для разработки распределенных и гибких приложений.

Когда рассматривается переход от монолитной архитектуры к микросервисной, непременно возникают как ожидаемые выгоды, так и вызовы.

**а) Выгоды:**

- *легкость масштабирования.* Благодаря независимости каждого сервиса, их можно масштабировать независимо друг от друга, обеспечивая более эффективное использование ресурсов. Возможность масштабирования отдельных компонентов системы, а не всего приложения целиком, позволяет эффективно управлять ростом нагрузки;

- *упрощение изменений.* Разделение функционала на микросервисы устраняет связность компонентов, что делает изменения и добавление нового функционала более простыми и безопасными;

- *гибкость в разработке.* Каждый сервис может быть разработан, развернут и масштабирован независимо от других, что упрощает процесс разработки и обновления;

- *лучшая отказоустойчивость.* Если один сервис выходит из строя, это не влияет на работоспособность других сервисов;

- *инновации.* Микросервисная архитектура позволяет использовать различные технологии и языки программирования для каждого сервиса, способствуя к инновациям.

**б) Вызовы:**

- *управление сложностью.* Увеличение числа микросервисов требует эффективного управления и мониторинга всей системы;

- *сетевая сложность.* Распределенная архитектура создает сложности в управлении сетевыми взаимодействиями и надежностью;

- *согласованность данных.* Поддержание согласованности данных в распределенной среде может быть сложной задачей.

В целом, микросервисная архитектура предоставляет большую гибкость и масштабируемость, но при этом влечет за собой определенные вызовы, такие как управление, сетевая сложность и поддержание согласованности данных в распределенной среде [1, 9-10, 16, 17].

Таким образом, к ключевым преимуществам внедрения микросервисной архитектуры можно отнести следующие характеристики и свойства данного ПО:

**1. Гибкость и масштабируемость:**

- *преимущество.* Микросервисы позволяют гибко масштабировать каждый компонент отдельно, что улучшает использование ресурсов и позволяет быстро адаптироваться к изменениям нагрузки;

- *пример.* Возможность горизонтального масштабирования сервисов в ответ на увеличение запросов от пользователей без необходимости масштабирования всей системы целиком.

## **2. Независимость и разделение обязанностей:**

- *преимущество.* Каждый микросервис может быть разработан, развернут и масштабирован независимо. Это способствует ускорению разработки и позволяет использовать разные технологии и методы в каждом сервисе;

- *пример.* Отдельные команды могут работать над определенными микросервисами, что повышает производительность и уменьшает зависимость между ними.

## **3. Снижение зависимостей:**

- *преимущество.* Микросервисная архитектура уменьшает связность между компонентами системы, что упрощает внесение изменений и обновлений в отдельные сервисы без влияния на всю систему;

- *пример.* Обновление функциональности или технологии в одном микросервисе не влияет на другие сервисы, что способствует изоляции изменений.

Точно таким же образом к основным недостаткам и проблемам внедрения микросервисной архитектуры можно отнести следующие характеристики и свойства исследуемого программного обеспечения:

### **1. Сложность управления микросервисами:**

- *проблема.* Увеличение числа сервисов требует эффективного управления конфигурацией, мониторингом и отладкой, что может привести к сложностям в управлении системой в целом;

- *пример.* Необходимость в реализации средств управления, таких как оркестраторы контейнеров или инструменты для управления конфигурацией микросервисов.

### **2. Сетевая сложность и надежность:**

- *проблема.* Распределенная природа микросервисов увеличивает сложность сетевых взаимодействий и может привести к проблемам с надежностью и задержками;

- *пример.* Ухудшение производительности из-за сетевых задержек и ошибок взаимодействия между сервисами.

### **3. Согласованность данных:**

- *проблема.* Поддержание согласованности данных в распределенной среде без единой точки управления может быть сложной задачей;

- *пример.* Необходимость использования специальных паттернов (например, Saga Pattern) для обеспечения согласованности данных в условиях распределенности.

### **4. Необходимость дополнительной инфраструктуры:**

- *проблема.* Внедрение микросервисов может потребовать дополнительной инфраструктуры и инструментов для обеспечения эффективной работы, и мониторинга системы [14];

- *пример.* Необходимость использования инструментов мониторинга, оркестраторов и инструментов для управления конфигурацией микросервисов.

**Стратегии перехода к микросервисной архитектуре.** Для успешного внедрения микросервисов в монолитную систему используются различные стратегии. Постепенное

разделение функционала является ключевым этапом, включающим идентификацию границ между сервисами и пошаговое выделение отдельных компонентов. Выбор подходящей стратегии разделения осуществляется на основе бизнес-функций или технологических аспектов системы [10, 13, 17].

**Методы разбиения монолита на отдельные микросервисы.** Для разбиения монолита на отдельные микросервисы применяются методы декомпозиции функций. Они включают использование Domain-Driven Design (DDD) для выделения ядерных бизнес-доменов и разделение функциональности на автономные модули. Обеспечение согласованности данных осуществляется через определение четких интерфейсов и контрактов между сервисами и применение паттерна Event-Driven Architecture (EDA) для управления обменом событиями между сервисами [16].

**Инструменты и практики для перехода к микросервисам.** Для эффективного перехода к микросервисной архитектуре используются инструменты и практики. Контейнеризация и оркестрация с помощью Docker и Kubernetes облегчают управление и развертывание микросервисов. Важную роль играют системы мониторинга, такие как Prometheus и Grafana, для отслеживания работы сервисов. Использование DevOps-практик, таких как автоматизация процессов развертывания с помощью Continuous Integration (CI) и Continuous Deployment (CD), также значительно облегчает процесс перехода.

Эти стратегии, методы и инструменты помогают эффективно и безопасно осуществлять переход от монолитной архитектуры к микросервисной, обеспечивая максимальную автономию и эффективность каждого сервиса в распределенной системе [15].

### **Организационные аспекты при внедрении микросервисов:**

**1. Изменения в процессах разработки.** Переход к более гибким и быстрым методологиям разработки, таким как Agile и DevOps, позволяет сократить время от идеи до выпуска продукта. DevOps позволяет автоматизировать процессы разработки, тестирования и развертывания, обеспечивая непрерывную поставку и высокую отказоустойчивость [8].

**2. Управление версиями и CI/CD.** Внедрение методов Continuous Integration (CI) и Continuous Deployment (CD) ускоряет процессы разработки и обеспечивает автоматизацию тестирования и развертывания изменений, что улучшает качество и частоту поставки обновлений [11].

**3. Развитие DevOps-культуры.** Создание среды, где разработчики и операционная команда работают в тесном взаимодействии, обмениваются знаниями и опытом, способствует автоматизации и стабильной работе системы [8].

Все эти аспекты, как технические, так и организационные, играют важную роль в успешном переходе к микросервисной архитектуре. Они обеспечивают не только эффективное управление и развертывание микросервисов, но и необходимые изменения в культуре и процессах для успешной работы с такой архитектурой.

**Заключение.** В современном информационном ландшафте внедрение микросервисной архитектуры становится неотъемлемой частью стратегии развития многих предприятий. В своей сущности микросервисы предлагают эффективный подход к разработке и поддержке приложений, обеспечивая более высокую гибкость, масштабируемость и надежность системы.

Технологические инструменты, такие как контейнеризация и оркестрация, становятся основополагающими при переходе к микросервисам. Применение Docker и Kubernetes, например, упрощает упаковку, доставку и масштабирование приложений, а также предоставляет решения для эффективного управления разнообразными сервисами в распределенной среде.

Однако успех внедрения микросервисной архитектуры не ограничивается технологиями. Организационные изменения играют критическую роль в успешной адаптации. Процессы разработки должны эволюционировать, чтобы стать более гибкими и ориентированными на автоматизацию через применение DevOps-практик. Continuous Integration и Continuous Deployment становятся неотъемлемыми элементами для сокращения времени поставки и обеспечения высокой степени автоматизации.

Организационные культурные изменения также необходимы. Создание коллаборативной среды между разработчиками и операционной командой способствует более эффективной коммуникации и обмену знаниями, что в свою очередь облегчает интеграцию и управление микросервисами.

Совокупность этих технических и организационных аспектов предоставляет компаниям возможность адаптироваться к изменяющимся потребностям рынка, реагировать на изменения быстрее и улучшать пользовательский опыт. Успешное внедрение микросервисов позволяет предприятиям быть более гибкими, инновационными и конкурентоспособными в современной высокотехнологичной среде.

**Выводы.** Проведенный анализ и результаты исследования показали, что:

1. Монолитные системы, сгруппировавшие весь функционал в одном блоке, показывают неэффективность в долгосрочной перспективе из-за трудностей с масштабированием и интеграцией новшеств.

2. Микросервисная архитектура, предложенная как альтернатива к монолитной системе, ориентируется на разбиение приложения на мелкие, независимые службы, каждая из которых отвечает за определённый набор функций. Такая структура не только упрощает внедрение изменений и обновлений, но и позволяет использовать разнообразные технологии и языки программирования для отдельных сервисов, обеспечивая устойчивость системы к технологическим сдвигам.

3. Процесс внедрения микросервисной архитектуры в монолитные системы предполагает не только переработку существующих систем, но и культурное и организационное переосмысление процессов разработки и поддержки программного обеспечения.

4. Переход к микросервисам становится ключевым элементом для достижения конкурентоспособности и эффективности информационных систем, адаптированных к требованиям современной экономики и инновационной деятельности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Архитектура контейнерных микрослужб (Azure Architecture Center) [Электронный ресурс] – URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/architecture/microservices/design/orchestration> (Date of the application: 01.04.2021).
2. Комилийён Ф.С., Раҳмонзода З.Ф. Алгоритмҳои амалисозии марҳилаҳои таъбиқи низоми идоракунии сифати хизматрасониҳои таълимӣ дар мактаби олии [Матн]. – Паёми политехники. Бахш: Интеллект. Инноватсия. Инвеститсия, 2021, № 2(54), с. 48-60. – EDN: TQJJKH.
3. Комилийён Ф.С. Ёров М.Р. Идоракунии компютери системаҳои иттилоотию хизматрасонӣ [Матн]: Монография. – Душанбе: Нӯшбод, 2023, 154 с. – EDN: ITPBXW.
4. Комилийён Ф.С. Информатика. Китоби дарсӣ барои донишҷӯёни муассисаҳои таҳсилоти олии касбӣ. Ҷилди 1. [Матн] – Душанбе: Донишварон, 2019, 408 с. – EDN: HFLELO.
5. Комилийён Ф.С. Информатика. Китоби дарсӣ барои донишҷӯёни муассисаҳои таҳсилоти олии касбӣ. Ҷилди 2 [Матн]. – Душанбе: Донишварон, 2019, 464 с. – EDN: RNYCDB.
6. Комилов Ф.С. Воинов А.А., Юнусов М.К. Математическое моделирование экосистем водохранилищ [Текст]. – Душанбе: Общество «Знание», 1989, 20 с. – EDN: GJODFF.
7. Комилов Ф.С. Пархоменко В.П. Математическое моделирование экосистем водохранилищ [Текст]. – М.: ВЦ РАН, «Сообщение по прикладной математике», 2003, 46 с. – EDN: QKMEUH.
8. Bass L. DevOps: A Software Architect’s Perspective [Electronic resource] Chapter 3. Addison-Wesley, Boston (Date of the application: 01.06.2015).
9. Fehling C. Service migration patterns – decision support and best practices for the migration of existing service-based applications to cloud environments [Electronic resource] – C. Fehling, F.Leymann, S.Ruehl, M.Rudek, S.Verclas (Date of the application: 01.12.2023).
10. Fowler M. Guide to Microservices [Electronic resource] – URL: <https://martinfowler.com/microservices/> (Date of the application: 15.07.2015).
11. Gaurav K. Building Microservices with NET Core [Electronic resource] / K. Gaurav, K. Lalit, M. Kanwar (Date of the application: 01.06.2017).
12. Mazlami G. Extraction of microservices from monolithic software architectures [Electronic resource] G. Mazlami et al. International Conference on Web Services (ICWS), 2017, IEEE. – P. 524-531.
13. Newman S. Building Microservices [Electronic resource] (Date of the application: 21.08.2019).
14. Sander V. Building and Managing Microservices with Kubernetes and Istio [Electronic resource] – URL: <https://www.oreilly.com/library/view/building-and-managing/9780137649686>. – Lesson Managing Microservices with Istio Service Mesh (Date of the application: 01.12.2021).
15. Sigma Software. Migrating Monolith to Microservices: Step-by-Step Guide [Electronic resource] URL: <https://sigma.software/about/media/migrating-monolith-microservices-step-step-guide> (Date of the application: 01.04.2021).
16. Springer Link. Migrating to Cloud-Native Architectures Using Microservices: An Experience Report [Electronic resource] – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-33313-7\\_15#:~:text=Section%20%20describes%20the%20architecture,Department%20of%20Computer%20Engineering](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-33313-7_15#:~:text=Section%20%20describes%20the%20architecture,Department%20of%20Computer%20Engineering) (Date of the application: 01.04.2021).
17. Yanaga E. Migrating to Microservice Databases Electronic [Electronic resource] URL: <https://www.oreilly.com/library/view/migrating-to-microservice/9781492048824/> (Date of the application: 01.01.2017).

М.Ф.РАҲИМОВ, Ф.С.КОМИЛИЁН\*

## ТАҲЛИЛИ ХУСУСИЯТҲОИ АРХИТЕКТУРАҲОИ МОНОЛИТӢ ВА МИКРОСЕРВИСӢ

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти математикаи ба номи А. Ҷӯраеви,  
\*Донишгоҳи миллии Тоҷикистон*

Мақола ба стратегияҳо ва усулҳои нармафзории аз архитектураи монолитӣ ба архитектураи микросервисӣ гузаштан бахшида шудааст. Дар он афзалиятҳо ва маҳдудиятҳои системаҳои монолитӣ, инчунин бартарихҳои системаҳои микросервисӣ тавсиф карда шуда, ҷанбаҳои техникӣ ва ташкилии татбиқи микросервисҳо дар инфрасохтори мавҷуда нишон дода шудааст.

**Калимаҳои калидӣ:** архитектураи монолитӣ, архитектураи микросервисӣ, нармафзор, таҳия, ҷойгиркунӣ, дастгирӣ, чандирӣ, эътимоднокӣ, идорашавандагӣ, микёспазири, маҳсулноқӣ.

M.F.RAKHIMOV, F.S.KOMILIYON\*

## ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF MONOLITHIC AND MICROSERVICE ARCHITECTURES

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
A.Dzhuraev Institute of Mathematics,  
\*Tajik National University*

This article sheds light on strategies and methods for transitioning from monolithic architecture to microservices in software. It describes the advantages and limitations of monolithic systems, as well as the benefits of microservices. The technical and organizational aspects of implementing microservices into existing infrastructure are outlined.

**Key words:** monolithic architecture, microservice architecture, software, development, deployment, support, flexibility, reliability, manageability, scalability, performance.

### **Сведения об авторах:**

**Рахимов Манучехр Фарходович** – докторант философии (PhD) – докторант по специальности Институт математики НАН Таджикистана. E-mail: manucher5160@gmail.com.

**Комилиён Файзали Саъдулло** – доктор физико-математических наук, Таджикский национальный университет, профессор кафедры информатики. E-mail: komfaiz@mail.ru.

УДК 523.532

Специальность: 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Г.И.КОХИРОВА, А.М.БУРИЕВ, С.Н.САФАРОВ, Ф.Дж.РАХМАТУЛЛАЕВА  
**РЕЗУЛЬТАТЫ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ АСТЕРОИДА  
2011 XZ1 В АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ САНГЛОХ**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт астрофизики НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 02.06.2023 г.*

*В Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики Национальной академии наук Таджикистана проведены астрометрические наблюдения астероида (420302) 2011 XZ1 во время сближения с Землей в августе 2020 г. Определены координаты объекта, видимая траектория и вычислена орбита астероида. Новые данные по динамическим свойствам астероида свидетельствуют о приемлемой точности наблюдений и астрометрических измерений, а также о стабильности динамики астероида, несмотря на близкий подход к Земле.*

**Ключевые слова:** астероид, наблюдения, астрометрия, координаты, точность, траектория, орбита.

### **Введение**

Основные цели оптических наземных наблюдений астероидов связаны с определением точных положений и орбит, блеска, диаметров и геометрической формы (возможное бинарное или множественное строение объекта, наличие спутника), структуры и состава поверхности, периода и ориентации оси вращения и других параметров. Задачи, связанные с мониторингом астероидов, включают астрометрию и фотометрию наблюдательного материала с целью определения или уточнения динамических и физических свойств объектов.

Астрометрические наблюдения небесных тел обеспечивают данные по их динамическим особенностям, включая орбитальные элементы, что позволяет судить о стабильности орбиты или ее изменениям. Нахождению точных положений астероидов и вычислению их орбит здесь придается особое значение. Чем больше измерено положений астероида на

---

*Адрес для корреспонденции:* Кохирова Гулчехра Исроиловна и Буриев Анварджон Махмадалиевич.  
734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Айни, 299/5, Институт астрофизики НАНТ.  
E-mail: kokhirova2004@mail.ru, anvar10@mail.ru.

больших временных интервалах, тем точнее вычисляется его орбита. Банк данных элементов орбит является наиважнейшим набором данных наземных наблюдений астероидов, поскольку именно на его основе идентифицируются известные астероиды, определяются расстояния до них и фазовые углы на момент наблюдений. На 21 марта 2023 г. в базах данных зарегистрировано 31523 астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), из которых 2326 являются потенциально опасными для Земли [1-2]. Общее количество известных объектов такого рода в Солнечной системе продолжает расти [1-2]. В отдельную группу отобраны потенциально опасные астероиды, имеющие тесные сближения с Землей на расстояниях менее 0.05 а.е.

### **Астероид, сближающийся с Землей (420302) 2011 XZ1**

Астероид, сближающийся с Землей (420302) 2011 XZ1, далее 2011 XZ1, был открыт 6 декабря 2011 г. с помощью телескопа Pan-STARRS 1 в обсерватории Мауна-Кеа в США. По первым наблюдениям была определена его орбита, и выяснилось, что астероид может сближаться с Землей на расстоянии 2.24 млн. км (0.15 а.е.). Один оборот вокруг Солнца астероид совершает за 3.12 года [1]. По нашим оценкам размер астероида составляет  $0.86 \pm 0.04$  км [3], по другим данным - от 0.73 км до 1.63 км [1]. Абсолютный блеск астероида 2011 XZ 1 составляет  $H=17.79$  звездных величин [1].

В 2020 г. произошел очередной близкий подход астероида к Земле на расстояние 27.2 млн. км. В ночь с 6 по 8 августа астероид пролетел мимо Земли на расстоянии менее 2.24 млн. км (0.15 а.е.). Следующее сближение астероида с Землей на расстоянии 23 млн. км произойдет 22 июля 2045 г. [2].

Элементы орбиты астероида 2011 XZ1, принадлежащего группе Амура, приведены в табл. 1, где  $a$  – большая полуось,  $e$  – эксцентриситет,  $q$  – перигелийное расстояние,  $i$  – наклонение орбиты,  $\omega$  – аргумент перигелия,  $\Omega$  – долгота восходящего узла,  $T_j$  – критерий Тиссерана [4], значение которого  $T_j > 3.12$  указывает на типично астероидную орбиту объекта.

Таблица 1

Элементы орбиты астероида 2011 XZ1

| Объект   | Эпоха    | $a$ ,<br>а.е. | $e$   | $q$ ,<br>а.е. | $i$ ,<br>град. | $\omega$ ,<br>град. | $\Omega$ ,<br>град. | $T_j$ |
|----------|----------|---------------|-------|---------------|----------------|---------------------|---------------------|-------|
| 2011 XZ1 | 21.01.22 | 2.138         | 0.461 | 1.153         | 6.663          | 36.345              | 273.691             | 3.563 |

Сближение астероида с Землей в августе 2020 г. создало благоприятные условия для его наблюдений, по обработке которых можно определить расстояние до астероида и его орбиту с хорошей точностью. Из астрометрических наблюдений получаются не только координаты объекта на небесной сфере, но и расстояние до него, и, следовательно, сразу определяется его положение и орбита. Это дает новые возможности для построения его траектории при пролете вблизи Земли и определения изменений его орбиты в результате пролета. Все эти сведения очень важны для поиска и разработки путей предотвращения и смягчения последствий возможных столкновений астероидов с Землей.



На телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики НАНТ с 6 по 8 августа 2020 г. выполнены астрометрические наблюдения астероида 2011 XZ1. Регистрация объекта выполнялась с помощью ПЗС камеры со следующими характеристиками:  $D/F=1000$  мм/13 300 мм, CCD FLI Pro Line 09000, FOV 10'x10', масштаб 0.579 arcsec/pixel с использованием широкополосных фотометрических фильтров системы Джонсона-Козинса –  $BVRI$ , экспозиции наблюдений составляли 20-120 секунд. Для уменьшения уровня шумов ПЗС камеры аппаратура была охлаждена до температуры  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Во время наблюдений было получено более 400 цифровых изображений объекта, из которых около 300 были пригодны для обработки. Положение орбиты астероида во время мониторинга и детали выполненных экспозиций приведены в табл. 2, где  $r$  и  $\Delta$  – расстояния астероида от Солнца и Земли,  $ph$  – фазовый угол,  $N$  и  $t$  – количество и время экспозиций. Изображение астероида 2011 XZ1, полученное во время наблюдений, показано на рис. 1.

Таблица 2

Сводка наблюдений астероида 2011 XZ1 в МАОС

| Дата       | $r$ ,<br>а.е. | $\Delta$ ,<br>а.е. | $ph$ ,<br>град. | N x Фильтр             | $t$ , с |
|------------|---------------|--------------------|-----------------|------------------------|---------|
|            |               |                    |                 | МАОС                   |         |
| 06.08.2020 | 1.157         | 0.197              | 41.072          | 27xB, 27xV, 27xR, 27xI | 20-120  |
| 07.08.2020 | 1.158         | 0.198              | 40.016          | 15xB, 15xV, 15xR, 15xI | 20-60   |
| 08.08.2020 | 1.159         | 0.200              | 39.907          | 36xB, 36xV, 36xR, 36xI | 20-60   |

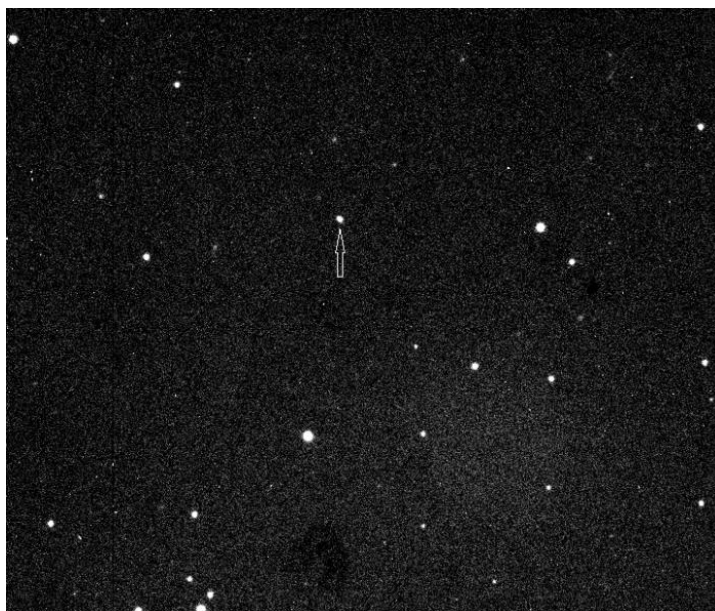


Рис. 1. Астероид 2011 XZ1, 7 августа 2020 г., экспозиция 60 сек, Цейсс-1000 МАОС.

Астрометрическая обработка наблюдений была выполнена с помощью программного пакета (ПП) АПЕКС-II [5]. В качестве опорного использован астрометрический каталог UCAC5, в котором астрометрическая точность координат звезд не превышает 0.05". При измерениях использована апертура радиусом 4.5", проекция которой на небесную

сферу соответствует  $\sim 585.91$  км. В табл. 3 представлены средние значения отклонений измеренных экваториальных координат (O) от вычисленных данных (C), обозначенные как  $(O-C)_\alpha$  и  $(O-C)_\delta$  для координат  $\alpha$  и  $\delta$  соответственно, а также их средние квадратичные ошибки  $\sigma_\alpha$  и  $\sigma_\delta$  по наблюдениям трех ночей в обсерватории МАОС. Как видно, средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции за весь период наблюдений не превышает  $0.064''$  и  $0.073''$  для прямого восхождения  $\alpha$  и склонения  $\delta$  соответственно. Такие значения  $(O-C)$  свидетельствуют о достаточно высокой точности полученных астрометрических данных.

Таблица 3

Средние разности  $(O-C)$  и их стандартные отклонения астрометрической обработки изображений астероида 2011 XZ1

| Дата       | $(O-C)_\alpha$ | $\sigma_\alpha$ | $(O-C)_\delta$ | $\sigma_\delta$ |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 06.08.2020 | -0.064         | $\pm 0.007$     | -0.063         | $\pm 0.007$     |
| 07.08.2020 | -0.051         | $\pm 0.009$     | -0.073         | $\pm 0.013$     |
| 08.08.2020 | -0.021         | $\pm 0.011$     | 0.015          | $\pm 0.012$     |

Ряд экваториальных координат 2011 XZ1 – прямое восхождение  $\alpha$  и склонение  $\delta$ , найденные в результате астрометрических измерений кадров, приведен в табл. 4. в графическом виде видимая траектория 2011 XZ1 по наблюдениям в МАОС и по другим наблюдениям [6] приведена на рис. 2.

Таблица 4

Экваториальные координаты астероида 2011 XZ1 по наблюдениям в МАОС

| №  | Дата, 2020 г. | Момент наблюдений (UT)                              | $\alpha$  | $\delta$                  | m (зв.вел.) |
|----|---------------|---|---|---------------------------|-------------|
| 1  | 06.08.2020    | 18 <sup>h</sup> 23 <sup>m</sup> 53 <sup>s</sup> .37 | 22 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> .57 | +24 <sup>o</sup> 12'39".4 | 15.8        |
| 2  | 06.08.2020    | 18 24 29.66   | 22 46 13.62   | +24 12 40.2               | 16.1        |
| 3  | 06.08.2020    | 18 25 6.81  | 22 46 13.67   | +24 12 41.1               | 15.7        |
| 4  | 06.08.2020    | 18 25 44.83   | 22 46 13.71   | +24 12 42.0               | 15.3        |
| 5  | 06.08.2020    | 18 27 12.09   | 22 46 13.82   | +24 12 44.0               | 15.9        |
| 6  | 06.08.2020    | 18 29 58.84   | 22 46 14.02   | +24 12 47.9               | 16.9        |
| 7  | 06.08.2020    | 18 32 25.72   | 22 46 14.21   | +24 12 51.2               | 16.8        |
| 8  | 06.08.2020    | 18 33 33.12   | 22 46 14.30   | +24 12 52.9               | 16.8        |
| 9  | 06.08.2020    | 18 34 39.64   | 22 46 14.37   | +24 12 54.5               | 15.6        |
| 10 | 06.08.2020    | 18 35 47.04   | 22 46 14.46   | +24 12 56.0               | 15.3        |
| 11 | 06.08.2020    | 18 37 28.99   | 22 46 14.58   | +24 12 58.3               | 16.0        |
| 12 | 06.08.2020    | 18 39 36.00   | 22 46 14.74   | +24 13 01.4               | 15.5        |
| 13 | 06.08.2020    | 18 42 26.20   | 22 46 14.95   | +24 13 05.2               | 16.1        |
| 14 | 06.08.2020    | 18 43 32.73   | 22 46 15.03   | +24 13 06.8               | 15.4        |
| 15 | 06.08.2020    | 18 47 37.24   | 22 46 15.34   | +24 13 12.4               | 16.6        |
| 16 | 06.08.2020    | 18 49 51.16   | 22 46 15.50   | +24 13 15.5               | 15.6        |
| 17 | 06.08.2020    | 18 50 59.42   | 22 46 15.58   | +24 13 17.1               | 15.2        |

Продолжение таблицы 4

| №  | Дата,<br>2020 г. | Момент наблюдений (UT) | $\alpha$    | $\delta$    | m (зв.вел.) |
|----|------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 18 | 06.08.2020       | 18 53 16.81            | 22 46 15.74 | +24 13 20.3 | 15.6        |
| 19 | 06.08.2020       | 18 54 24.19            | 22 46 15.83 | +24 13 21.9 | 15.6        |
| 20 | 06.08.2020       | 18 55 30.72            | 22 46 15.91 | +24 13 23.4 | 15.3        |
| 21 | 06.08.2020       | 18 56 41.56            | 22 46 15.99 | +24 13 25.0 | 17.1        |
| 22 | 06.08.2020       | 18 58 56.35            | 22 46 16.17 | +24 13 28.1 | 15.7        |
| 23 | 06.08.2020       | 19 00 02.88            | 22 46 16.25 | +24 13 29.7 | 15.3        |
| 24 | 06.08.2020       | 19 02 21.12            | 22 46 16.42 | +24 13 32.8 | 15.6        |
| 25 | 06.08.2020       | 19 03 27.64            | 22 46 16.50 | +24 13 34.4 | 15.6        |
| 26 | 06.08.2020       | 19 04 35.04            | 22 46 16.58 | +24 13 36.0 | 15.3        |
| 27 | 06.08.2020       | 19 05 45.88            | 22 46 16.66 | +24 13 37.5 | 16.9        |
| 28 | 06.08.2020       | 19 07 59.80            | 22 46 16.83 | +24 13 40.6 | 15.6        |
| 29 | 06.08.2020       | 19 12 32.83            | 22 46 17.16 | +24 13 46.9 | 15.6        |
| 30 | 06.08.2020       | 19 13 40.22            | 22 46 17.24 | +24 13 48.5 | 15.3        |
| 31 | 06.08.2020       | 19 15 57.60            | 22 46 17.41 | +24 13 51.6 | 16.2        |
| 32 | 06.08.2020       | 19 17 40.99            | 22 46 17.49 | +24 13 53.2 | 15.6        |
| 33 | 06.08.2020       | 19 18 12.38            | 22 46 17.57 | +24 13 54.8 | 15.3        |
| 34 | 06.08.2020       | 19 19 23.23            | 22 46 17.66 | +24 13 56.4 | 17.0        |
| 35 | 06.08.2020       | 19 20 29.76            | 22 46 17.74 | +24 13 57.9 | 16.2        |
| 36 | 06.08.2020       | 19 21 37.15            | 22 46 17.83 | +24 13 59.5 | 15.6        |
| 37 | 06.08.2020       | 19 22 43.68            | 22 46 17.91 | +24 14 01.0 | 15.3        |
| 38 | 06.08.2020       | 19 23 55.39            | 22 46 18.00 | +24 14 02.7 | 15.3        |
| 39 | 06.08.2020       | 19 25 10.92            | 22 46 18.07 | +24 14 04.2 | 15.5        |
| 40 | 06.08.2020       | 19 26 30.31            | 22 46 18.16 | +24 14 05.7 | 15.5        |
| 41 | 06.08.2020       | 19 27 16.70            | 22 46 18.23 | +24 14 07.1 | 15.3        |
| 42 | 06.08.2020       | 19 28 26.68            | 22 46 18.32 | +24 14 08.8 | 15.7        |
| 43 | 06.08.2020       | 19 29 34.94            | 22 46 18.39 | +24 14 10.2 | 15.8        |
| 44 | 06.08.2020       | 19 30 42.33            | 22 46 18.49 | +24 14 12.0 | 15.6        |
| 45 | 06.08.2020       | 19 31 48.86            | 22 46 18.57 | +24 14 13.5 | 15.3        |
| 46 | 06.08.2020       | 19 32 59.71            | 22 46 18.65 | +24 14 15.2 | 15.7        |
| 47 | 06.08.2020       | 19 34 10.10            | 22 46 18.74 | +24 14 16.8 | 15.9        |
| 48 | 06.08.2020       | 19 35 13.63            | 22 46 18.82 | +24 14 18.3 | 15.7        |
| 49 | 06.08.2020       | 19 36 21.02            | 22 46 18.90 | +24 14 19.8 | 15.3        |
| 50 | 06.08.2020       | 19 37 31.87            | 22 46 18.99 | +24 14 21.4 | 17.1        |
| 51 | 06.08.2020       | 19 39 45.79            | 22 46 19.14 | +24 14 24.4 | 15.6        |
| 52 | 06.08.2020       | 19 40 53.18            | 22 46 19.22 | +24 14 26.0 | 15.4        |
| 53 | 06.08.2020       | 19 42 4.032            | 22 46 19.31 | +24 14 27.6 | 17.2        |
| 54 | 06.08.2020       | 19 43 11.42            | 22 46 19.40 | +24 14 29.2 | 16.8        |
| 55 | 06.08.2020       | 19 45 26.20            | 22 46 19.56 | +24 14 32.3 | 15.3        |
| 56 | 06.08.2020       | 19 46 37.056           | 22 46 19.64 | +24 14 34.0 | 17.1        |
| 57 | 06.08.2020       | 19 47 43.58            | 22 46 19.72 | +24 14 35.3 | 16.1        |

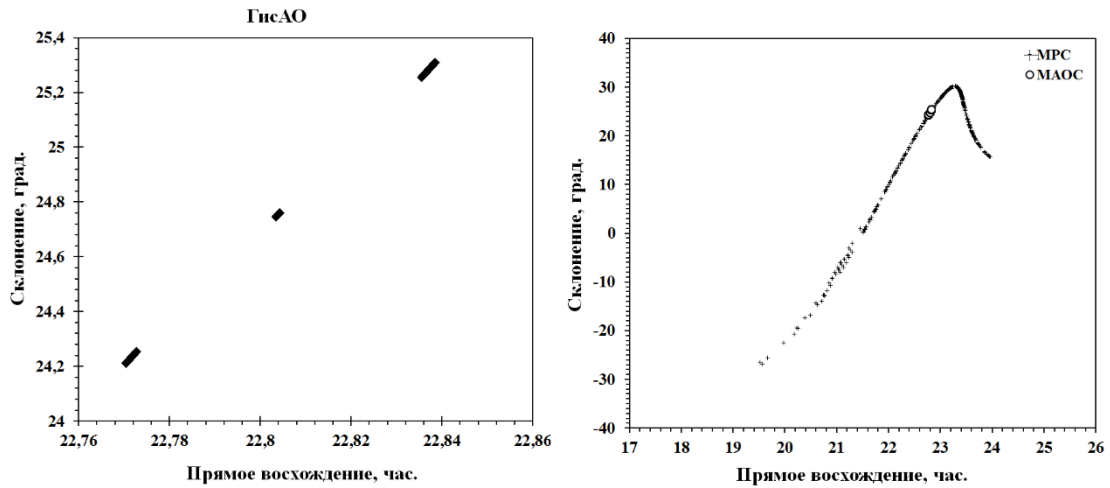


Рис. 2. Видимая траектория астероида 2011 XZ1 по наблюдениям в МАОС и данным других наблюдений.

Таблица 5

Сравнение орбиты астероида 2011 XZ1, полученной по наблюдениям обсерватории Санглюх, и орбиты MPC (J2000.0)

| Элементы орбиты  | МАОС<br>[данная работа]   | МРЕС 2022-P103 | $\chi$    |
|--|---------------------------|----------------|-----------|
| Кол-во положений, использованное для вычисления орбиты | 220                       | 3077           | -         |
| T  | JD 2459057.815            | JD 2459057.811 | -         |
| Эпоха  | 2458992.5                 | 2459800.5      | -         |
| e  | $0.4616324 \pm 0.00283$   | 0.4610460      | 1.4E-07   |
| a, а.е.  | $2.13967135 \pm 0.0123$   | 2.1387589      | 2.8E-07   |
| q, а.е.  | $1.15192962 \pm 0.000591$ | 1.1526927      | -6.5E-06  |
| i, град.   | $0.349307 \pm 0.000110$   | 0.349631       | -0.000324 |
| $\omega$ , град.                                       | $36.26010 \pm 0.090$      | 36.32706       | -2E-05    |
| $\Omega$ , град.                                       | $273.72514 \pm 0.060$     | 273.70183      | -6.6E-05  |
| n, град./сут.  | $0.31490783 \pm 0.00271$  | 0.31510920     | -1E-06    |
| $\sigma$   | 0".220                    | 0".390         |           |

Орбита вычисляется с использованием измеренных координат астероида в нескольких положениях. Для этого существует много методов, которые применяются в зависимости от расположения измеренных точек на орбите и от того, какие возмущения учитываются. Вычисление орбиты 2011 XZ1 выполнялось с использованием ПП ЭПОС [7]. В табл. 5 приведены элементы первоначальной орбиты, вычисленные для среднего момента наблюдений с использованием 220 положений. Здесь даны стандартные элементы орбиты в равноденствии 2000.0, а также  $n$  – среднее суточное движение,  $\sigma$  – средняя квадратичная ошибка. Для сравнения в табл. 5 приведена орбита, вычисленная на основе 3077 положений из наблюдений астероида в различных обсерваториях согласно базе данных MPC [8], в

последнем столбце приведены величины разности между вычисленной нами орбитой и орбитой MPC, обозначенные как  $\chi$ . Как видно, с учетом разности моментов времени, на которые вычислены орбиты, по наблюдениям в МАОС получена орбита, близкая к орбите MPC, следовательно, орбита астероида во время сближения с Землей, оставалась стабильной.

### Заключение

В результате наблюдений астероида (420302) 2011 XZ1, выполненных в Международной астрономической обсерватории Санглюх ИА НАНТ в период его сближения с Землей 6-8 августа 2020 г.:

- определены экваториальные координаты (положения) объекта, построена видимая траектория;

- средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукации не превышает 0.064" и 0.073" для прямого восхождения  $\alpha$  и склонения  $\delta$ , соответственно, что является показателем высокой точности измерений;

- вычислена орбита астероида в период сближения с Землей, которая имеет минимальные отклонения от орбиты базы данных MPC [6].

Динамические свойства астероида, найденные по новым наблюдениям, свидетельствует о приемлемой точности выполненных наблюдений и астрометрических измерений, а также о стабильности динамики астероида в период сближения с Землей. Результаты наблюдений в МАОС находятся в хорошем соответствии с данными других наблюдений из базы Международного центра малых планет.

### ЛИТЕРАТУРА

1. CNEOS, <https://ssd.jpl.nasa.gov>, 2022.
2. Small Amor-class Asteroid. <https://www.spacereference.org>, 2022.
3. Г.И.Кохирова, А.М.Буриев, С.Н.Сафаров, Ф.Дж.Рахматуллаева Физические свойства астероида 2011 XZ1 по наблюдениям в период сближения с Землей. – ДАН РТ, 2023, т. 66, № 3-4, с. 342-351.
4. NEODyS-2, <https://newton.spacedys.com>, 2022.
5. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «АПЕКС-I» и «АПЕКС-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений. – Астрон. Вестник, 2010, № 1, с.74-87.
6. MPC, <https://minorplanetcenter.net>, 2022.
7. Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы. – Астрон. Вестник, 2012, т. 46, № 2, с. 190-192.
8. MPEC 2022-P103, <https://www.minorplanetcenter.net>, 2022.

Г.И.ҚОҶИРОВА, А.М.БУРИЕВ, С.Н.САФАРОВ, Ф.Ҷ.РАҲМАТУЛЛОЕВА  
**НАТИҶАҶОИ МУШОҶИДАҶОИ АСТРОМЕТРИИ АСТЕРОИДИ 2011 XZ1  
ДАР РАСАДҶОНАИ АСТРОНОМИИ САНГЛОХ**

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти астрофизикаи АМИ Тоҷикистон*

Дар Расадхонаи астрономии байналмилалӣ Санглох (РАБС)-и Институти астрофизикаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон дар моҳи августи соли 2020 мушоҳидаҳои астрометрии астероиди (420302) 2011 XZ1 ҳангоми наздик шуданаш ба Замин гузаронида шуд. Координатаҳои ҷирм, масири зоҳирӣ муайян карда шуда, мадори астероид ҳисоб карда шуд. Маълумотҳои нав дар бораи хусусиятҳои динамикии астероид дурустии қобили қабули мушоҳидаҳо ва ченкунии астрометрӣ, инчунин устувории динамикаи астероидро сарфи назар аз наздик шудан ба Замин нишон медиҳанд.

**Калимаҳои калидӣ:** астероид, мушоҳидаҳо, астрометрия, координатҳо, дақиқӣ, траектория, мадор.

G.I.KOKHIROVA, A.M.BURIEV, S.N.SAFAROV, F.J.RAKHMATULLOEVA  
**ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF ASTEROID 2011 XZ1  
AT SANGLOCH ASTRONOMIC OBSERVATORY**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
Institute of Astrophysics*

Astrometric observations of asteroid (420302) 2011 XZ1 during its approach to the Earth in August 2020 were carried out at the Sanglokh International Astronomical Observatory (IAOS) of the Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan. The coordinates of the object, the apparent trajectory were determined, and the orbit of the asteroid was calculated. New data on the dynamic properties of the asteroid indicate an acceptable accuracy of observations and astrometric measurements, as well as the stability of the asteroid's dynamics, despite its close approach to the Earth.

**Key words:** asteroid, observations, astrometry, coordinates, accuracy, trajectory, orbit.

**Сведения об авторах:**

**Кохирова Гульчехра Исроиловна** – доктор физико-математических наук, Института астрофизики НАН Таджикистана, директор. E-mail: kokhirova2004@mail.ru,

**Бурiev Анвар Махмадалиевич** – кандидат физико-математических наук, Институт астрофизики НАН Таджикистана, зав. отделом ОФКА. E-mail: anvar10@mail.ru.

**Сафаров Сангин** – Институт астрофизики НАН Таджикистана, младший научный сотрудник ОФК.

**Рахматуллоева Фируза Джамшедовна** – кандидат физико-математических наук, Институт астрофизики НАН Таджикистана, зам. директора.

УДК 541.64:539.2

Специальность: 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Х.М.АБДУЛЛАЕВ, Э.Д.ШАИМОВ, Р.Т.КАДЫРОВ, Ш.П.ИСМАТОВ

**РЕЛАКСАЦИОННЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ  
СВОЙСТВА ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СО-  
ПОЛИЭФИРОВ**

*Таджикский национальный университет*

*Поступила в редакцию 11.05.2023 г.*

*Проведены исследования диэлектрических свойств двухкомпонентных термотропных ЖК-сополиэфиров (СПЭФ) на основе полиэтилентерефталата и п-оксибензойной кислоты разного состава и разной удельной вязкости ( $\eta_{уд}$ ) в температурном интервале 173-473 К. Выявлены три релаксационных перехода при температурах 233, 355 и 383 К и две области резкого возрастания диэлектрической проницаемости полимеров, соответствующие размораживанию кооперативной сегментальной подвижности и началу течения СПЭФ, соответственно. Первая температура (233 К) соответствует  $\beta$ -переходу, обусловленному локальной подвижностью эфир-фенильных групп,  $\alpha$ -релаксационные переходы связаны с кооперативным движением эфир-ароматических и этиленгликолевых сегментов в некристаллических (355) и кристаллических (383 К) фазах двухкомпонентных сополиэфиров. Температуры, соответствующие  $\beta$ - и  $\alpha$ -релаксационным переходам, не зависят от состава и величины  $\eta_{уд}$  СПЭФ. Эти характеристики сополиэфиров оказывают влияние на величину диэлектрической проницаемости и на температурную зависимость  $\epsilon'$ . Сопоставление результатов диэлектрических измерений с деформационно-прочностными свойствами СПЭФ показало, что температуры  $\beta$ - и  $\alpha$ -переходов соответствуют температурам хрупкости и стеклования сополимеров.*

**Ключевые слова:** жидкокристаллический сополиэфир, релаксация, деформация, прочность, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость.

В работе [1] впервые было показано, что возникновение подвижности (расстекловывание) составляющих молекулярную цепь структурных единиц вследствие нагревания приводит к изменению температурной зависимости таких макроскопических

---

*Адрес для корреспонденции:* Абдуллаев Хасан Муминджонович. 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17. Таджикский национальный университет. E-mail: KhAbdullaev@bk.ru.

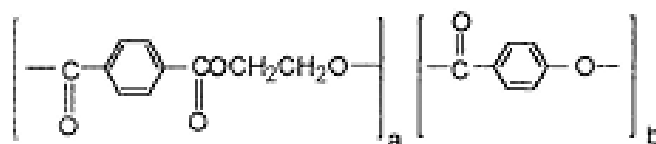
характеристик разрушения полимера, как разрывная прочность ( $\sigma_p$ ) и относительная деформация разрыва ( $\varepsilon_p$ ). Физическая природа связи между температурными изменениями  $\sigma_p$  и  $\varepsilon_p$ , и характеризующей интенсивность молекулярной подвижности, ширины резонансной линии ЯМР ( $\Delta H$ ), видится в том, что при отсутствии подвижности напряжение, приложенное к образцу, воспринимается лишь небольшой частью молекулярных цепей или их участков [2]. Включение нового элемента цепи в процесс разрушения полимера отражается в виде изломов и «ступенек» на температурных зависимостях  $\sigma_p$ ,  $\varepsilon_p$  и  $\Delta H$  [3].

Природа изломов или скачков на температурных зависимостях электрической прочности и диэлектрических потерь аналогична природе изломов на температурной зависимости механических потерь и прочности и является следствием влияния процессов физической релаксации на структуру полимера в микрообластях перенапряжений [4].

Как показано в [5], молекулярная подвижность в термотропных ЖК-полиэфирах, в отличие от обычных полимеров, должна иметь свои особенности, обусловленные их ЖК-упорядочением. Анализ динамических кривых ЖК-полиэфиров показывает, что температурный интервал размораживания подвижности наиболее жесткой структурной единицы СПЭФ определяет его температурный интервал стеклования.

Если процесс расстекловывания составляющих молекулярную цепь структурных единиц многокомпонентных ЖК-сополиэфиров интенсивно изучается, то работ, посвященных установлению связи между характером молекулярной подвижности и деформационно-прочностными свойствами и долговечностью ЖК-полимеров практически нет. Между тем, такие исследования важны для правильного прогнозирования эксплуатационных характеристик ЖК-полимеров в широком температурном интервале.

Исследования проводились на двухкомпонентных ЖК-сополиэфирах на основе ПЭТФ (а) и *n*- оксibenзойной кислоты (ОБК) (b)



разной удельной вязкости и разного соотношения компонентов в температурном интервале от 173 до 473 К.

| Образец | $\eta_{уд}$ | a, % | b, % |
|---------|-------------|------|------|
| I       | 0.30        | 30   | 70   |
| II      | 0.67        | 35   | 65   |
| III     | 0.72        | 40   | 60   |

Механические испытания сополиэфиров I и II проводили на экструдатах, полученных из их гомогенных расплавов [6] на вискозиметре МВ-2м при температурах 240 и 265°C и постоянном напряжении сдвига  $l\tau=4$  Па, соответственно. Значения  $\sigma_p$  и  $\varepsilon_p$  экструдатов с



длиной рабочей части 10 мм и диаметром 1.4 мм определяли на разрывной машине при постоянстве времени до разрыва образцов  $\tau=10$  с. При заданной температуре испытывались не менее 7 образцов, находились средние значения  $\sigma_p$  и  $\epsilon_p$ ; разброс не превышал 5-7% от среднего значения. Температуру в зоне образца поддерживали с точностью  $\pm 1$ К. Измерения диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости проводили на мосту переменного тока Р-5079 при частоте 1 кГц.

Как известно [7], к основным релаксационным (температурным) переходам в полимерах относят  $\alpha$ -релаксацию или стеклование при  $T_g$ ,  $\beta$ -процесс, соответствующий переходу образца из хрупкого в вынужденно-эластическое состояние при температуре хрупкости  $T_{хр.}$  и  $2\alpha$ -процесс, который соответствует температуре текучести материала.

Релаксационные свойства ПЭТФ, а также ЖК- и нежидкокристаллических полимерных композиций на его основе известны из ряда работ [5, 8-14]. В таблице приведены температурные интервалы размораживания фрагментов молекулярных цепей таких систем, полученных различными физическими методами и их отнесение к определенным типам релаксаций.

Таблица

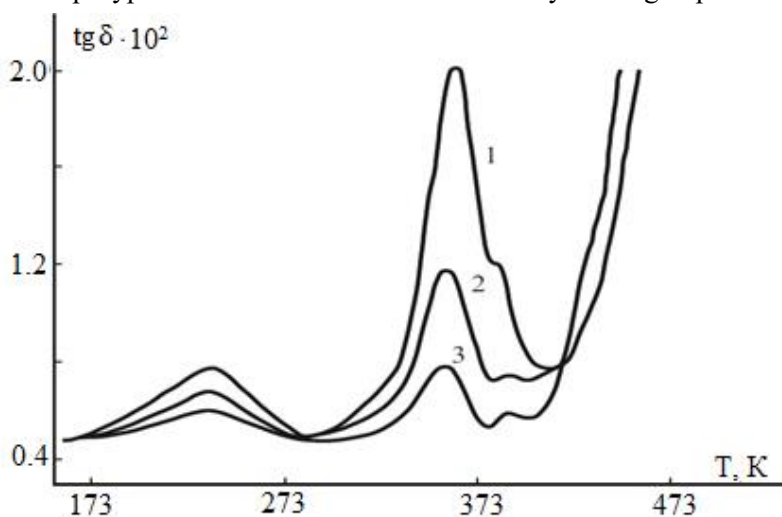
Типы релаксации в ПЭТФ и композициях на его основе

| Полимер          | Фрагмент   | Тип релаксации | T, К    | Метод       | Литература |
|------------------|--|----------------|---------|-------------|------------|
| Смеси ПЭТФ       | Этилен   | $\gamma$       | 193-273 | Диэлектрика | [8]        |
| ГБК-ПЭТФ         | -  | $\gamma$       | -       | Диэлектрика | [9], [10]  |
| ПЭТФ, смеси ПЭТФ | Карбонильные группы с фенильными ядрами  | $\beta$        | 283-313 | Диэлектрика | [11]       |
| ГБК-ПЭТФ         | Эфир-фенильные группы  | $\beta$        | 233     | Диэлектрика | [9]        |
| ПЭТФ             |  | $\beta$        | 233     | ЯМР         | [12]       |
| ГБК-ЭТФ          | Остаток терефталевой кислоты (ТФК)   | $\beta$        | 213-293 | ДМР         | [5]        |
| ГБК-ПЭТФ         | Этиленгликоль и эфир-фенильные группы  | $\alpha$       | 338     | Диэлектрика | [9]        |
| ПЭТФ, смеси ПЭТФ | Расстекловывание неупорядоченных областей<br>Расстекловывание упорядоченных областей | $\alpha'$      | 363     | Диэлектрика | [12]       |
|                  |  | $\alpha''$     | 385     |             |            |
| ГБК-ПЭТФ         | Остаток гидроксibenзойной кислоты (ГБК)  | $\alpha'$      | 303-333 | ДМР         | [5]        |
|                  |  | $\alpha''$     | 273-383 | ЯМР         |            |
| ПЭТФ             |  | $\alpha'$      | 349     | МРР         | [13]       |
|                  |  | $\alpha''$     | 273-373 | ЯМР         |            |
| ПЭТФ-ОБК         | Остаток ОБК  | $\alpha$       | 361     | ДМР         | [14]       |

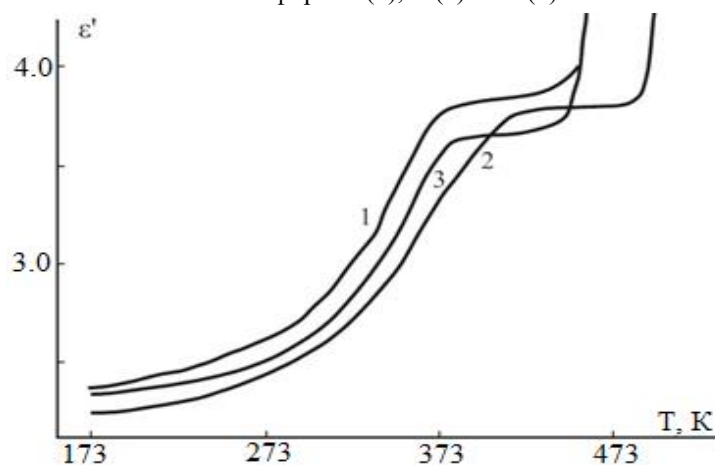
Из приведенных в таблице данных следует различие температурных интервалов, в которых происходит размораживание подвижности определенных фрагментов молекулярной цепи. Обращает на себя внимание также богатство релаксационных переходов как собственно в ПЭТФ, так и в композитах на его основе. Это может быть обусловлено как влиянием состава системы на проявление процесса релаксации, так и с особенностями

применяемых методов исследования. Также характерна близость температурных областей релаксации фрагментов гидроксibenзойной кислоты (ГБК) и расстекловывания ПЭТФ и присущая обоим этим процессам двухступенчатость  $\alpha$ -процесса релаксации.

На рис. 1 и 2 представлены, соответственно, температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) образцов I-III двухкомпонентного сополиэфира. Из рис. 1 видно, что в температурном интервале 163-473 К наблюдаются два достаточно четких релаксационных перехода, расположенные в интервалах температур 183-283 К и 333-403 К с максимумами  $\text{tg}\delta$  при 233 и 355 К.



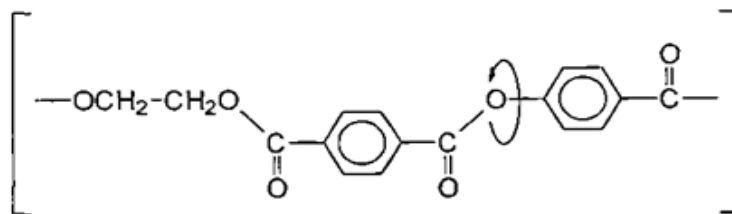
**Рис. 1.** Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь сополиэфиров I (1), II (2) и III (3).



**Рис. 2.** Температурные зависимости диэлектрической проницаемости сополиэфиров I (1), II (2) и III (3).

Высокотемпературный релаксационный переход является составным и содержит еще один слабо выраженный максимум при  $\sim 383$  К. Кривые температурной зависимости диэлектрической проницаемости (рис. 2, кривые 1-3) образцов I-III также обнаруживают две области резкого возрастания  $\epsilon'$ ; первая – 333-383 К и вторая – выше 453 К (рис. 2).

Рассмотрим теперь указанные зависимости более подробно. Как следует из приведенной ниже структурной схемы ароматические кольца исследуемых СПЭФ непосредственно связаны эфирными группами, в которых локализованы дипольные моменты.



Согласно [10, 15, 16] низкотемпературный  $\beta$ -релаксационный переход обусловлен вращением эфир-ароматических единиц цепи вокруг O–C (фенил) связи. Это движение, размораживающееся при 233 К является локально ротационным. Энергия активации  $\beta$ -процесса, определенная из температурной зависимости частоты в аррениусовских координатах составляет 48 кДж/моль.

В интервале 333–403 К на зависимостях  $\text{tg}\delta(T)$  наблюдается достаточно четкий релаксационный переход при температуре 355 К ( $\alpha'$ ) и слабо заметный ( $\alpha''$ ) – при 383 К. Наблюдаемые высокотемпературные переходы относятся к области  $\alpha$ - релаксации. Энергия активации  $\alpha'$ -перехода составляет 460 кДж/моль. Второй максимум также частотно зависим, однако определение его энергии активации из-за малых значений  $\text{tg}\delta$  и близости его к области проводимости не представляется возможным.

Согласно ЯМР-исследованиям, регистрирующим свободное перемещение этиленовых сегментов при  $T > 343$  К, кооперативная сегментальная подвижность цепи СПЭФ обусловлена включением –O–CH<sub>2</sub>–CH<sub>2</sub>–O– сегментов в движение эфир-фенильных единиц и стеклование сополиэфиров связано с размораживанием подвижности остатков *n*- ОБК [5]. Это не взаимоисключающие предположения, поскольку располагающиеся между жесткими фенильными ядрами подвижные сегменты этиленгликоля могут способствовать началу свободной ротации ароматического остатка *n*-ОБК.

Из приведенных данных таблице следует, что ПЭТФ и композициям на его основе характерна двухстадийность процесса стеклования. Наличие двух  $\alpha$ - переходов на температурных зависимостях  $\text{tg}\delta$  гомополимера ПЭТФ объясняется поэтапным расстекловыванием менее упорядоченных и более плотных участков полимера [12].

Согласно [17] двухкомпонентные сополиэфиры являются двухфазными по структуре. Поэтому можно полагать, что наблюдаемые на зависимостях  $\text{tg}\delta(T)$   $\alpha'$ - и  $\alpha''$ -релаксационные переходы можно отнести к расстекловыванию сегментов в некристаллических (ЖК) и кристаллических фазах СПЭФ, соответственно. Существенно более слабое проявление высокотемпературного максимума можно объяснить малым содержанием кристаллической фазы в объеме материала.

Из приведенных данных рис. 1 следует, что температуры релаксационных переходов СПЭФ не зависят от соотношения компонентов и от величины удельной вязкости.

Действие этих факторов сказывается на величинах диэлектрических потерь сополиэфиров. Эти результаты согласуются с выводами работы [5].

Из температурных зависимостей диэлектрической проницаемости образцов I-III видно, что в интервале от 173 до 293 К наблюдается слабое, практически линейное возрастание  $\epsilon'$ . При 298 К значение  $\epsilon'$  СПЭФ составляет 2.55-2.75, что несколько меньше по сравнению с соответствующей величиной для ПЭТФ (3,1). Это может быть связано с меньшей плотностью диполей [9] и ухудшением корреляции в их ориентации в термотропных сополиэфирах.

С повышением температуры происходит более заметное возрастание  $\epsilon'$ . Наибольший рост  $\epsilon'$  наблюдается в интервалах температур 333-373 К (образцы I и III) и 333-403 К (образец II). Выше было отмечено, что в указанных температурных интервалах ротация эфирных групп (диполей) происходит не только посредством релаксации эфир-фенильного сегмента, но и через релаксацию приобретших значительную подвижность этиленгликолевых сегментов. Возрастание подвижности эфирных групп способствует резкому увеличению  $\epsilon'$ .

Из сравнения кривых (1-3) рис. 2 следует, что несмотря на одинаковый ход температурных зависимостей  $\epsilon'$ , диэлектрическая проницаемость зависит как от величины  $\eta_{уд}$  так и от состава СПЭФ. С возрастанием  $\eta_{уд}$ , при близком соотношении компонентов (кривые 1 и 2), также как и с увеличением мольной доли ОБК, при близких  $\eta_{уд}$  (кривые 2 и 3) подвижность диполей уменьшается.

В интервале 373-453 К (образцы I и III) и 403-483 К (образец II) диэлектрическая проницаемость СПЭФ практически не изменяется с температурой (рис. 2). В указанном интервале температур межцепное движение все еще ограничено взаимодействием жестких фенильных групп, а подвижность стерически связанных эфирных групп не может приводить к росту  $\epsilon'$ . При дальнейшем повышении температуры начинается крупномасштабное движение элементов структуры, связанное с течением ЖК-матрицы. Этот процесс сопровождается резким возрастанием  $\epsilon'$ . Данный переход на кривых  $\text{tg}\delta(T)$  из-за сильно возросшей электропроводности СПЭФ зафиксировать не удастся.

Рассмотрим теперь как влияют вышеуказанные релаксационные переходы на температурную зависимость деформационно-прочностных свойств экструдатов сополиэфиров I и II. Отметим, что предполагаемые изменения в ходе температурных зависимостей разрывной прочности ( $\sigma_p$ ) и остаточной деформации разрыва ( $\epsilon_p$ ) исследуемых ЖК сополиэфиров могут быть обусловлены влиянием релаксационных переходов, поскольку согласно рентгенографическим исследованиям в интервале температур 293-403 К сополиэфиры на надмолекулярном уровне структурных изменений (если не считать слабого возрастания степени кристалличности до ~10%) не претерпевают.

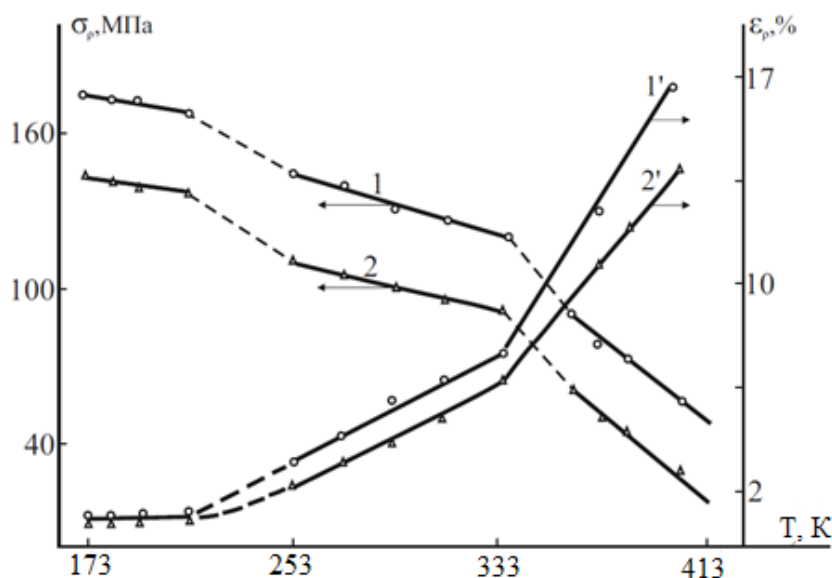
В первой температурной области сополиэфиры испытывают хрупкое разрушение, их деформация разрыва не превышает 1.5-2%. Во второй температурной области в образцах развивается частичная вынужденно-эластическая деформация и остаточная деформация разрыва полимера в зависимости от температуры и напряжения возрастает до 6-7%.

Таким образом, в пределах одного физического состояния- стеклообразного, в зависимости от температуры и  $\sigma$  образцы СПЭФ обнаруживают разные механизмы разрушения.

Различие во временной зависимости прочности полимеров при низких и высоких температурах (ниже и выше  $T_{хр.}$ ) впервые было открыто в работах [1, 4]. Бартеневым Г.М. [16] было показано, что оба механизма разрушения являются проявлением общей кинетической природы разрушения полимеров. Термофлуктуационный механизм разрушения, проявляющийся более четко в хрупком состоянии, выше температуры хрупкости усложняется релаксационными процессами.

На рис. 3 приведены графики зависимости разрывной прочности и деформации образцов I и II от температуры при постоянном времени до разрыва ( $\tau=10$  с) в широком температурном интервале. На основании этих графиков можно более четко установить температуры, при которых изменяется характер зависимостей  $\sigma_p(T)$  и  $\varepsilon_p(T)$ .

Как видно из рисунка в интервале температур  $-100$  до  $130^\circ\text{C}$  зависимости  $\sigma_p(T)$  и  $\varepsilon_p(T)$  состоят из трех линейных отрезков, претерпевающих изломы в температурных интервалах 213-253 К и 333-353 К. На первом участке наблюдается очень слабая температурная зависимость значений  $\sigma_p$  и  $\varepsilon_p$ . При изменении температуры от 173 до 213 К разрывная деформация СПЭФ практически не изменяется, а значение  $\sigma_p$  падает всего на 6-8 МПа. При переходе через точку излома наклон зависимостей увеличивается, что свидетельствует о возрастании роли температуры в изменении прочностных и деформационных характеристик полимера. На втором участке зависимостей  $\sigma_p(T)$  и  $\varepsilon_p(T)$   $\varepsilon_p$  составляет 5-7% и падение значений  $\sigma_p$  с температурой становится более заметным (145 МПа при 293 и 120 МПа при 333 К).



**Рис. 3.** Температурные зависимости разрывной прочности (1, 2) и деформации разрыва (1', 2') сополиэфиров I (1, 1') и II (2, 2').

Температура, соответствующая переходу от первого ко второму участку зависимости  $\sigma_p(T)$ , представляет собой температуру хрупкости СПЭФ. Из рис. 3 следует, что  $T_{хр.}$

сополиэфиров составляет 233 К. Ниже этой температуры СПЭФ разрушаются хрупко, а выше их разрушению предшествует частичная вынужденно-эластическая деформация.

В третьей температурной области СПЭФ находится в высокоэластическом состоянии. Температура перехода из состояния вынужденно-эластического к высокоэластическому разрушению (~353 К) совпадает с температурой  $\alpha$ -перехода на релаксационных кривых СПЭФ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Песчанская Н.Н., Степанов В.А. Долговечность и деформация полимеров при низких температурах. – ФТТ, 1965, т. 7, вып. 10, с. 2962-2968.
2. Sacher E. Effect of molecular motion on time-dependent fracture. – J. Macrom. Sci., 1978, v. B15, №11, pp. 171-181.
3. Песчанская Н.Н., Степанов В. А. Влияние молекулярной подвижности, вида напряженного состояния, ориентации и пластификации на зависимость свойств линейных полимеров от температуры. – Мех. полим., 1971, №1, с.30-4.
4. Цой Б., Лаврентьев В.В., Калонтаров И.Я. Влияние релаксационных переходов на механические и электрические свойства полимеров. – Матер. школы "Проблемы старения и стабилизации полимеров" – Душанбе: Ирфон, 1986, с.229-243.
5. Годовский Ю.К., Волегова И.А. Динамические механические свойства ряда термотропных ЖК-полиэфиров. – Высокомолек.соед., 1994, т. А36, №3, с. 419-424.
6. Abdullaev Kh.M., Tuichiev Sh.T., Kurbanaliev M.K., Kulichikhin V.G. The effect of phase heterogeneity on the melt rheology of copolyesters and structural-mechanical parameters of their extrudates. - Polymer science, 1997, v. B39, №5-6, pp. 226-229.
7. Слукин А.Д. О строении полимеров и температурных переходах в них. – Высокомолек. соед., 1987, т. Б16, №6, с. 403-407.
8. Лушейкин Г. А., Войтешонок В.Г. Особенности дипольно-сегментальной релаксации в полиэтилентерефталате, полученные методом электронно-термического анализа. – Высокомолек. соед., 1975, т. А17, №2, с. 429-430.
9. Takase Y., Mitchell G.R., Odajima A. Dielectric behavior of rigid-chain thermo-tropic copolyesters. – Polym. Commun., 1986, v. 27, №3, pp. 76-78.
10. Satoh N., Nakanishi A. Dynamic viscoelastic properties of liquid crystalline polymers. – J. Tosoh. Res., 1992, v. 36, №1, pp. 87-92.
11. Coburn J.C., Boyd R.FI. Dielectric relaxation in poly (ethylene terephthalate). – Macromolecules, 1986, v. 19, №8, pp. 2238-2245.
12. Суровцев В.И., Виленский В.А., Зеленская-Суровцева Н.М., Безуглая Т.Н. Релаксационные явления в смесях на основе полиэтилентерефталата. – Высокомолек. соед., 1995, т. А37, №5, с. 823-828.
13. Duiser J.A., Keijzers A.E.M. Determination of the glass-rubber transition of poly(vinyl chloride) and poly(ethylene terephthalate) by small-angle X-ray scattering. Polymer, 1978, v. 19, №8, pp. 889-894.
14. Benson R.S., Lewis D.N. Dynamic mechanical behaviour of liquid crystalline p-oxybenzoatepoly (ethylene terephthalate) copolymers. – Polym. Commun., 1987, v. 28, №10, pp. 289-291.
15. Alhaj-Mohammed M.H., Davies G.R., Abduljawad S., Ward I.M. The dielectric properties of liquid-crystal random copolyesters of 4-hydroxybenzoic acid and 2-hydroxy 6-naphtoic acid. – J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed., 1988, v. B26, №8, pp.1751-1760.

16. Бартенов Г.М. Природа временной зависимости прочности и механизм разрушения стеклообразных полимеров выше температуры хрупкости. – Высокомолек. соед., 1969, т. А11, №10, с. 2341-2346.
17. Abdullaev Kh.M., Tuichiev Sh.T., Shermatov D.S. Phase transformations in copolyesters based on poly(ethylene terephthalate) and hydroxybenzoic acid. – Polymer Science, 1997, А39, №5, pp. 567-571.

**Ҳ.М.АБДУЛЛОЕВ, Э.Қ.ШОИМОВ, Р.Т.ҚОДИРОВ, Ш.П.ИСМАТОВ**  
**ХОСИЯТҲОИ РЕЛАКСАТСИОНӢ ВА**  
**МУСТАҲКАМӢ-ДЕФОРМАТСИОНИИ СОПОЛИЭФИРҲОИ**  
**ДУКОМПОНЕНТАИ МОЕЪКРИСТАЛӢ**

*Донишгоҳи миллии Тоҷикистон*

Хосиятҳои диэлектрики сополиэфирҳои (СПЭФ) моеъкристаллии дукомпонента дар асоси полиэтилентерефталат ва туршии п-оксибензоии таркиб ва часпакии хосашон ( $\eta_x$ ) гуногун дар соҳаи ҳароратҳои 173-473 К омӯхта шуданд. Се гузаришҳои релаксатсионӣ дар ҳароратҳои 233, 355, 383 К ва ду соҳаи афзоиши нуфузпазирии диэлектрикӣ ошкор гардиданд, ки ба пайдоиши чобукияти кооперативии сегментӣ ва ибтидои чоришавии СПЭФ мувофиқ меоянд. Ҳарорати ибтидоӣ (233 К) ба  $\beta$ -гузариш мувофиқ меояд, ки он бо чобукияти гурӯҳҳои эфир-фенилӣ вобаста аст,  $\alpha$ -равандҳои релаксатсионӣ бо ҳаракати кооперативии сегментҳои эфир-ароматӣ ва этиленгликолӣ дар фазаҳои ғайрикристаллӣ (355 К) ва кристаллии (383 К) сополиэфирҳо алоқаманданд. Ҳароратҳои ба  $\beta$ - ва  $\alpha$ -равандҳои релаксатсионӣ мувофиқ аз таркиб ва бузургии  $\eta_x$ -и СПЭФ новобастаанд. Тавсифҳои зикршуда ба бузургии нуфузпазирии диэлектрикӣ ва вобастагии ҳароратии  $\epsilon'$  таъсир мерасонанд. Муқоисаи натиҷаҳои таҳқиқоти диэлектрикӣ бо хосиятҳои деформатсионӣ мустаҳкамӣ СПЭФ нишон медиҳад, ки ҳароратҳои  $\beta$ - ва  $\alpha$ -гузаришҳо ба ҳароратҳои муртӣ ва шишашавии сополиэфир мувофиқ меоянд.

**Калимаҳои калидӣ:** сополиэфирӣ, моеъкристаллӣ, релаксатсия, деформатсия, мустаҳкамӣ, талафи диэлектрикӣ.

**Kh.M.ABDULLAEV, E.D.SHAIMOV, R.T.KADIROV, Sh.P.ISMATOV**  
**RELAXATION AND DEFORMATION-STRENGTH PROPERTIES**  
**OF TWO-COMPONENT LIQUID CRYSTALLINE COPOLYESTERS**

*Tajik National University*

The dielectric properties of two-component thermotropic LC- copolyesters (CPE) based on polyethylene terephthalate and p-oxybenzoic acid with different composition and different specific viscosity ( $\eta_s$ ) in the temperature interval 173-473 K have been studied. Three relaxation transitions were detected at the temperatures 233, 355 and 383 K and two regions of steep increase of the polymers dielectric permeability corresponding to defrosting of the cooperative segmental mobility and the beginning of the CPE flow, respectively. The first temperature (233 K)

corresponds to  $\beta$ -transition due to the local mobility of ester-phenyl groups,  $\alpha$ -relaxation transitions are associated with the cooperative movement of ester-aromatic and ethylene glycol segments in non-crystalline (355 K) and crystalline (383 K) phases of two-component copolyesters. The temperatures corresponding to  $\beta$ - and  $\alpha$ -relaxation transitions do not depend on the composition and the value  $\eta_s$  of the CPE. These characteristics of the copolyesters influence the dielectric permittivity value and the temperature dependence  $\epsilon'$ . Comparison of the results of dielectric measurements with deformation-strength properties of CPE showed that the temperatures  $\beta$ - and  $\alpha$ -correspond to the temperatures of brittle and glass transition of the copolyesters.

**Key words:** liquid crystalline copolyester, relaxation, deformation, strength, dielectric losses, dielectric permeability.

#### **Сведения об авторах:**

**Абдуллаев Хасан Муминджонович** – доктор физико-математических наук, Таджикский национальный университет, профессор кафедры физики твёрдого тела. E-mail: KhAbdullaev@bk.ru.

**Шаимов Эркин Джаборович** – кандидат физико-математических наук, Таджикский национальный университет, доцент кафедры физики твёрдого тела.

**Кадыров Рустам Туранович** – кандидат физико-математических наук, Таджикский национальный университет, доцент кафедры физики твёрдого тела.

**Исмаев Шахбоз Партовович** – Таджикский национальный университет, ассистент кафедры физики твёрдого тела.



УДК 541.65.654

Специальность: 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

У.Дж.РАХИМОВА, М.Х.ЭГАМОВ\*, Х.Ш.ГАЮРОВ

**ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА В НЕМАТИЧЕСКИХ  
ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ 4-ПЕНТИЛ-4'-ЦИАНОБИФЕНИЛА**

*Таджикский государственный университет права, бизнеса и политики,  
\*Худжандский научный центр НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 20.10.2023 г.*

*Исследовано влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) в виде цетилтриметил аммоний бромида (ЦТАБ) в нематических жидкокристаллических ячейках типа 5СВ. Установлена взаимосвязь между концентрациями вводимого ПАВ и углом поворота плоскости поляризации. Указаны четкие границы линейной и эллиптической поляризации прошедшего через ячейку света в зависимости от концентрации ПАВ ЦТАБ. Предложены возможные применения таких материалов в полупроводниковой и твердотельной лазерной технике и дисплейных технологиях.*

**Ключевые слова:** поверхностно-активное вещество, жидкий кристалл, светопропускание, ориентация, оптическая анизотропия, плоскость поляризации.

Хотя за последние полвека достигнуты ощутимые успехи в исследовании структуры и свойств жидких кристаллов, относящихся к оптической электронике, голографии и информационной безопасности [1-3], некоторые вопросы в этом аспекте все еще остаются до конца нерешенными. К таким проблемам можно отнести взаимосвязи ориентационного порядка в нематиках в присутствии катионных поверхностно активных веществ (ПАВ). В сущности, данная задача довольно многогранна, и ее решение во многом определяется разновидностью введенных в объем нематика микрочастицы в качестве примеси, их природой, а также рядом внешних дестабилизирующих факторов [4]. В нематиках наблюдается эффект двулучепреломления, который может управляться внешними полями (электрическим, магнитным, световым, звуковым или механическим). Такой эффект позволяет моделировать световое излучение оптического диапазона по фазе, амплитуде и поляризации.

---

*Адрес для корреспонденции:* Рахимова Умедахон Джурабоевна. 735700, Республика Таджикистан Согдийская область г. Худжанд, 17 мкр-р. дом 1, Таджикский государственный университет права, бизнеса и политики. E-mail: rakhimova0508@mail.ru

При исследовании нематических жидких кристаллов (НЖК) в отсутствие внешних сил, за счет анизотропии показателя преломления ( $\Delta n$ ) можно изменять ориентацию плоскости поляризации светового излучения, проходящего через ячейку. Соответственно, они могут применяться в качестве сред для пассивных оптических фазовращателей и служить как альтернативный вариант для водных растворов на основе глюкозы и красителей [5, 6].

Существует аналогичный способ разработки ЖК-элементов, предназначенных для поляризации светового излучения под действием электрического поля (активный режим), либо при их отсутствии (пассивный режим). Для этого с целью улучшения яркости, контраста и быстродействия, применяются специальные ориентирующие поверхности с заранее выбранной морфологией [7], а объем ячейки ЖК заполняется наночастицами или поверхностно-активными веществами (ПАВ). При введении наночастиц или ПАВ в ЖК-среду, анизотропия показателя преломления ( $\Delta n$ ) сильно меняется. Следовательно, последний аргумент влияет на величину изменения плоскости поляризации между падающими и прямо прошедшими через ЖК-ячейку лучами

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \Delta n = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot (n_e - n_o), \quad (1)$$

где  $d$  – толщина ЖК слоя;  $n_o$  – показатель преломления для обыкновенного луча;  $n_e$  – показатель преломления для необыкновенного луча. В уравнении (1) величина  $n_o$  является постоянной величиной для исследуемого ЖК-материала, а  $n_e$  строго зависит от степени ориентации директора (преимущественная направления ориентации молекул вдоль главной оптической оси) ЖК. Изменение плоскости поляризации  $\Delta\varphi$  в уравнении (1) отрицательно влияет на работу ЖК-устройств как в пассивном, так и в активном режиме. Поэтому, с целью снижения нежелательных потерь интенсивности моделируемого светового пучка, необходимо решать задачу согласования ЖК элементов с оптической схемой устройства по положению плоскости поляризации. Данная работа посвящена решению именно такого рода проблеме.

Для решения указанной задачи исследовались влияния концентрации поверхностно-активных сред (ПАВ) в виде наночастиц из катионного сурфактанта – цетилтриметиламмоний бромида (ЦТАБ) на величину изменения плоскости поляризации света в нематическом жидком кристалле (НЖК) 4-пентил-4-цианобифениле (5СВ). Это позволяет согласовывать по степени ориентации плоскости поляризации жидкокристаллическую ячейку и поляризатор не только за счет толщины слоя, но и за счет концентрации ЦТАБ. Жидкокристаллическая ячейка была создана в конфигурации твист-нематика, состоящая из двух параллельно расположенных стеклянных пластин, с одной стороны которых были нанесены проводящие металлические покрытия на основе оксидов индия-олова (ITO). Последние имели толщину  $\sim 200$  нм с тройным содержанием 74% (In), 18% (O<sub>2</sub>) и 8% (Sn) по весу. В тонких слоях покрытие ITO становится прозрачным и бесцветным, поэтому в ИК области спектра действует как металлическое стекло. Тонкие пленки ITO осаждали на поверхности стеклянных подложек посредством физического осаждения из паровой фазы.

Для подготовки и перемешивания ЖК смеси использовали магнитную мешалку со скоростью вращения 3500 об/мин. Толщину ЖК слоя регулировали тефлоновыми прокладками. Для определения вращения плоскости поляризации использовался Ge-Ne лазер с длиной волны  $\lambda=0.633$  нм при комнатной температуре. Первоначальное положение поляризатора и анализатора выбирали таким способом, чтобы при размещении двух противоположно расположенных стеклянных пластинок с толщиной ЖК ячейки 8 – 10 мкм выполнялось максимальное пропускание света. Прошедший сигнал через ячейку регистрировался на фотоприемнике ФД-10-ГБ.

Результаты наблюдений показали, что конфигурации исследуемых нами ячеек при введении ПАВ, состоят из совокупности двух составляющих: за счет концентрации ПАВ и изменения плоскости поляризации в боковых ограничивающих плоскостях. Последние почти не вносят вклад на исследуемый нами эффект, поэтому их можно не учитывать. На рис.1 иллюстрированы зависимости коэффициента светопропускания ЖК ячеек 5СВ с различными концентрациями ПАВ от угла поворота образцов по отношению к анализатору и поляризатору (рис.1).

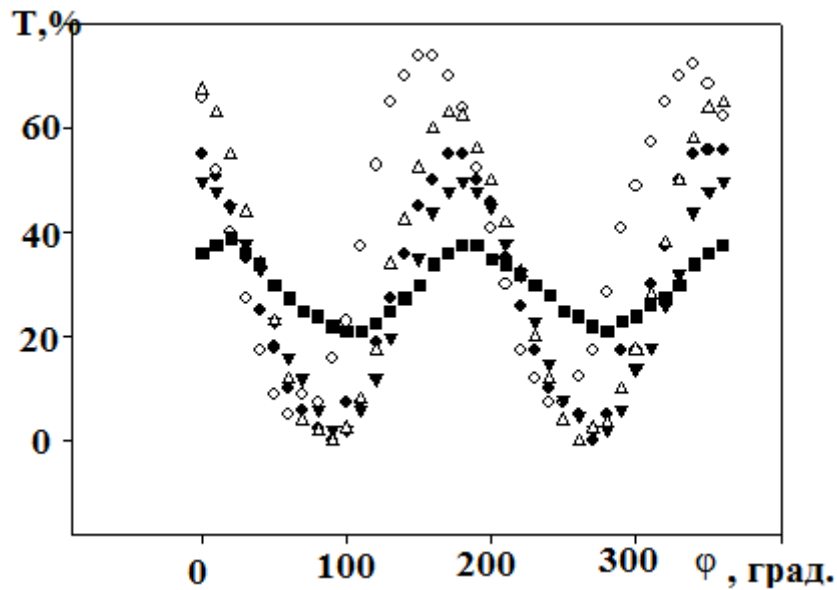
Экспериментальную установку для определения зависимости коэффициента светопропускания ЖК ячеек с разными концентрациями от взаимного расположения между анализатором и поляризатором собирали таким способом, чтобы максимальное пропускание наблюдалось между 0 и 180°, а минимальное пропускание наблюдали при 90 и 270°. Тогда можно выявить положение максимумов коэффициентов пропускания на основе закона Малюса. Эти сдвиги хорошо прослеживаются при анализе значений, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Изменения плоскости поляризации в ЖК ячейки

| Положение экстремума коэффициента пропускания | Концентрация ЦТАБ в составе НЖК 5 СВ, вес.% |       |       |       |       |
|---|---|-------|-------|-------|-------|
|   | 0   | 0.05  | 0,1   | 0.3   | 0.5   |
| 90°   | 86.1  | 85.7  | 66.4  | 94.8  | 101.5 |
| 180°  | 173.8                                       | 174.3 | 155.0 | 181.9 | 186.6 |
| 270°  | 266.1                                       | 266.0 | 245.4 | 172.1 | 279.8 |
| 360°  | 255.5                                       | 353.4 | 338.1 | 361.8 | 375.5 |

Как видно, с ростом концентрации ПАВ ЦТАБ наблюдается сдвиг всех максимумов, кроме образцов, содержащих 0.1% ЦТАБ, по отношению к максимуму коэффициента светопропускания для исходного НЖК 5СВ. Причем, среднее отклонение положения экстремумов по отношению к исходному НЖК 5СВ для концентрации 0.05 и 0.1 % отрицательно (соответственно на -0.5° и -19.2°), а для концентраций 0.3% и 0.5% положительно (соответственно на 7.3° и 15.5°). В [8] показано, что концентрация 0.1% соответствует концентрационному условию, при котором выполняется переход из нематического состояния к смектическому. В нашем же случае такой переход проявляется в изменении поляризационных свойств исследуемых пленок.



**Рис. 1.** Зависимость светопропускания НЖК 5СВ ячеек от угла вращения поляризатора (■) – исходный; (◆) – 0,05 вес.%; (◊) – 0,1 вес.%; (▼) – 0,3 вес.%; (Δ) – 0,5 вес.%.

Из рис. 1 мы можем определить отношение амплитуд интенсивности излучения, прошедших через жидкокристаллические ячейки относительно оси  $ox$  и  $oy$ . Основным условием для определения амплитуды интенсивности излучения по оси  $ox$  коэффициент пропускания должен быть максимальным, а по оси  $oy$ , наоборот, минимальным. Тогда, используя сдвиг экстремумов  $\Delta\varphi$  и отношения  $I_{ox}/I_{oy}$  можно определить азимутальный угол  $\alpha$  и эллиптический угол  $\varepsilon$ , которые объясняют излучение при эллиптической поляризации [8];

$$tg(2\alpha) = \frac{2\sqrt{\frac{I_{ox}}{I_{oy}}}}{1 - \left(\frac{I_{ox}}{I_{oy}}\right)} \cdot \cos(\Delta\varphi), \quad (2)$$

$$\sin(2\varepsilon) = \frac{2\sqrt{\frac{I_{ox}}{I_{oy}}}}{1 + \left(\frac{I_{ox}}{I_{oy}}\right)} \cdot \sin(\Delta\varphi). \quad (3)$$

Оказалось, что для исходного НЖК 5СВ и ячейки с концентрацией 0,05% ЦТАБ-а световые излучения, прошедшие через ячейки, можно воспринимать как поляризованные, так как отношение  $I_{ox}/I_{oy}$  больше 100; в ячейках, содержащих НЖК 5СВ и концентрации 0.1 и 0.3 вес.% ЦТАБ-а, световые излучения можно считать линейно поляризованными, ибо выполняется условие  $10 < I_{ox}/I_{oy} < 100$ ; а ячейка с содержанием 0.5 вес.% ПАВ-а служит

средством для получения эллиптической поляризации света. В последнем случае имеет место условие  $I_{ox}/I_{oy}$  меньше 100. Для интерпретации полученных результатов мы учитывали влияние ПАВ ЦТАБ-а на директор НЖК 5СВ. Для этого выбирали оси z так, чтобы выполнялось условие перпендикулярности к плоскости стеклянной подложки. В таком случае зависимость показателя преломления ( $n_e$ ) от угла смещения  $\theta$  экстремумов записывается выражением

$$n_e(\theta) = \frac{n_{\perp} n_{\parallel}}{\sqrt{n_{\perp}^2 (\cos \theta(z))^2 + n_{\parallel}^2 (\sin \theta(z))^2}}. \quad (4)$$

Здесь при пассивном режиме (при отсутствии внешнего поля) ячейки  $n_e = n_{\parallel}$ , где  $\Delta n = n_{\parallel} - n_0$ , а при активном режиме (то есть при присутствии внешнего электрического поля) -  $n_e = n_{\perp}$ , где  $\Delta n = n_{\perp} - n_0$ . Это означает, что под действием внешнего электрического поля наблюдается переориентация директора НЖК 5СВ и локальные флуктуации диполей в объеме капли жидкого кристалла относительно вводимых ПАВ ЦТАБ. Полученные результаты также можно объяснить с изменением анизотропии показателя преломления ( $n_e$ ), которые находятся в хорошем согласии с результатами работ [9], где были исследованы аналогичные параметры по быстроедействию ЖК ячеек. Проанализировав экспериментальные данные по изменению состояния плоскости поляризации в ячейках из НЖК 5СВ и концентрацией ПАВ ЦТАБ выдвигаются следующие выводы.

При концентрациях ПАВ ЦТАБ 0.3 и 0.5 вес. % можно изменять положение плоскости поляризации по отношению к исходной ячейке НЖК 5СВ соответственно на 7.3 и 15.5°. Аналогичные результаты можно получать при концентрациях 0,1 вес. % на величину 19.2°, а для 0.05 вес. % всего лишь на 0.5°, которое мы связываем с погрешностью измерительных аппаратур и незначительным флуктуациям оптических свойств концентрированных НЖК по отношению к исходным ячейкам.

Изменение концентрации ЦТАБ способствует не переставать толщину ЖК ячеек и не прибегать к применению дополнительных механизмов и устройств типа вращателей плоскости поляризации для согласования НЖК элементов с внешними оптическими схемами. Данный факт имеет ценный практический интерес для дисплейных технологий, так как можно интегрировать композит НЖК с добавкой ПАВ ЦТАБ, с улучшенными спектральными и динамическими характеристиками, установить в корпус устройства фиксации толщины. Исследуемые ЖК-композиты могут использоваться как пассивные вращатели плоскости поляризации, величина вращения которых перестраивается за счет изменения концентрации ПАВ ЦТАБ и толщины слоя ячейки. Для лазерной техники данная взаимосвязь выгодна в тех условиях, когда не имеется возможности изменять толщину слоя или же невозможно изменение положения поляризатора.

Работа выполнена в рамках проекта «Исследование структуры, механические и оптические свойства новых оптоэлектронных элементов на основе полимерно-

жидкокристаллических композитов» на 2021-2025 гг., за № гос. регистрации 0121TJ1107 от 10.03.2021 г. и финансируемого из госбюджета Республики Таджикистана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. de Gennes P.G., Prost J. The Physics of Liquid Crystals. Clarendon Press, Oxford, 1993, 597 p.
2. Вальков А.Ю., Романов В.П., Шалагинов А.Н. Флуктуации и рассеяния света в жидких кристаллах. – УФН, 1994, т.164, вып. 2, с.149-193.
3. Egamov M.Kh. The structural transformation of polymer dispersed liquid crystalline films in external deformation field. – Journal of Physics: Conference Series, 2018, p.012013.
4. Попов В.А., Гилев В.Г., Захлевных А.Н. Влияние слабого сцепления на магнитный переход Фредерикса в ферронематическом жидком кристалле. – Физика твердого тела, 2018, т.60, вып. 7, с.1445-1450.
5. Krizhanovskii D.N., Sanvitto D., Shelykh I.A., Glazov M.M., Malpucchi G., Solnyshkov D.D., Kavokin A., Ceccarelli S., Skolnick M.S., Roberts J.S. – Phys. Rev. B. 2006, v.93, №7, p.073303.
6. Warsi S.S.A., Manohar R. – Ind. J. Sci. Technol., 2022, v. 15, №21, pp. 1052-1059.
7. Chausov D.N., Kurilov A.D., Kucherov R.N., Simakin A.V., Gudkov S.V. – J. Phys.: Condens. Matter. 2020, v. 32, №39, p. 395102.
8. Калитаевский Н.И. Волновая оптика. Учеб. пособие для университетов. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1978, 383 с.
9. Лойко В.А., Конколович А.В., Мискевич А.А. – ЖЭТФ, 2016, т.149, №2, с.200-207.

У.Ҷ.РАҲИМОВА, М.Ҷ.ЭГАМОВ\*, Ҳ.Ш.ФАЮРОВ

#### ДИГАРГУНШАВИИ ҲАМВОРИИ ПОЛЯРИЗАТСИЯ ДАР КРИСТАЛЛИ МОЕИ НЕМАТИКИ НАВЪИ 4-ПЕНТИЛ-4-СИАНОБИФЕНИЛ

*Донишгоҳи давлатии ҳуқуқ, бизнес ва сиёсати Тоҷикистон,  
\*Маркази илмӣи Ҳуҷанди АМИ Тоҷикистон*

Таъсири маводи сатҳии фаъол дар мисоли сетилтриметил аммоний бромид (СТАВ) ба ячейкаи кристалли моеи нематикӣ навъи 4-пентил-4-сианобифенил (5СВ) омӯхта шудааст. Алоқамандии мутақобилаи байни концентратсияи маводи сатҳии фаъол ва кунҷи гардиши ҳамвории поляризацсия муқаррар карда шудааст. Сарҳади саҳеҳи поляризацсияи хаттӣ ва эллипсоидалии рӯшноии аз ячейка гузашта дар алоқамандӣ аз концентратсияи маводи сатҳии фаъоли СТАВ нишон дода шудааст. Вариантҳои имконпазири татбиқи ҷунин маводҳо дар техникаи лазерии нимноқилӣ ва технологияҳои дисплей пешниҳод гардидааст.

**Калимаҳои калидӣ:** маводи сатҳии фаъол, кристалли моеъ, рӯшноигузаронӣ, самтнокшавӣ, анизотропияи оптикӣ, ҳамвории поляризацсия.

U.J.RAKHIMOVA, M.Kh.EGAMOV\*, Kh.Sh.GAYROV

## CHANGES IN THE PLANE OF POLARIZATION OF LIGHT IN NEMATIC LIQUID CRYSTALS BASED ON 4-PENTYL-4'-CYANOBIPHENYL

*Tajik State University of Law, Business and Politics,*

*\*Khujand Scientific Center of the National Academy of Sciences of Tajikistan*

The influence of surface-active substances (surfactants) in the form of cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) in nematic liquid-crystal cells of the 5CB type was studied. A relationship has been established between the concentrations of the injected surfactant and the angle of rotation of the polarization plane. The clear boundaries of the linear and elliptical polarization of the light transmitted through the cell are indicated depending on the concentration of the CTAB surfactant. Possible applications of such materials in semiconductor and solid-state laser technology and display technologies are proposed.

**Key words:** surfactant, liquid crystal, light transmission, orientation, optics anisotropy, plane of polarization.

### **Сведения об авторах:**

**Рахимова Умедахон Джурабоевна** – старший преподаватель кафедры информационно-коммуникационных технологий и программирования ТГУПБП (Таджикистан, Худжанд). E-mail: rakhimova0508@mail.ru;

**Эгамов Мухтор Хасанович** – кандидат физико-математических наук, заместитель директора Худжандского научного центра НАН Таджикистан. E-mail: egamov62@mail.ru;

**Гаюров Хаким Шарифович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационно-коммуникационных технологий и программирования ТГУПБП (Таджикистан, Худжанд). E-mail: gayrov1964@mail.ru.

УДК 547.841

Специальность: 1.4.3 – Органическая химия

Э.Х.ПУЛАТОВ, Д.Д.ТОХИРОВ, М.З.ТУРДИАЛИЕВ, Б.Г.МАВЛОНОВ, С.А.УМАРОВ

**ТИАЗОЛИДИНЫ И ТИАДИАЗИНЫ СОПРЯЖЕННЫЕ  
С 1,4-БЕНЗОДИОКСАНОМ**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 05.09.2023 г.*

*Путём взаимодействия сульфохлорид- и бромацетилбензодиоксана с бинуклеофильными реагентами получены соответствующие сульфамидные и тиосемикарбазидные производные. Полученные сульфамидные производные в определенных условиях с электрофильными реагентами образуют тиазолидиновые гетероциклы, в случае тиосемикарбазидного производного с  $\alpha$ -бромацетильным фрагментом путем внутримолекулярной циклоконденсации образуются тиадiazиновые гетероциклы.*

**Ключевые слова:** оксикетоны-сульфохлорид и бромацетилбензодиоксаны, электрофильные и бинуклеофильные реагенты, тиазолидины, тиадiazины.

Гетероциклические соединения тиазолидинового, тиадiazинового и бензодиоксанового ряда представляют интерес с фармакологической точки зрения. Среди продуктов циклизации производных ацетиленовых спиртов известны разнообразные биологически активные вещества, например, 1,3-тиазолидины как антимикробные [1], 1,3,4-тиадiazины по предотвращению тромбоза крови, то есть с антикоагулянтными свойствами по отношению к крови [2], тогда как производные 1,4-бензодиоксанового ряда являются стимуляторами и депрессантами центральной нервной системы [3].

В свете последних данных по пандемии «коронавируса», одним из губительных последствий влияния вируса на организм человека является образование тромбов в кровеносных сосудах. Таким образом, исследования в направлении синтеза и модификации тиадiazинов имеет важную социальную направленность.

---

*Адрес для корреспонденции:* Пулатов Элмурод Холикулович. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2, Институт химии НАНТ. E-mail: Pulod510@mail.ru



В наших предыдущих работах показано, что простым в исполнении является синтез изомерных тиадиазинов на основе оксикетонов, являющихся продуктами гидратации ацетиленовых спиртов, которые легко вступают в реакцию с бифункциональными реагентами [4-7].

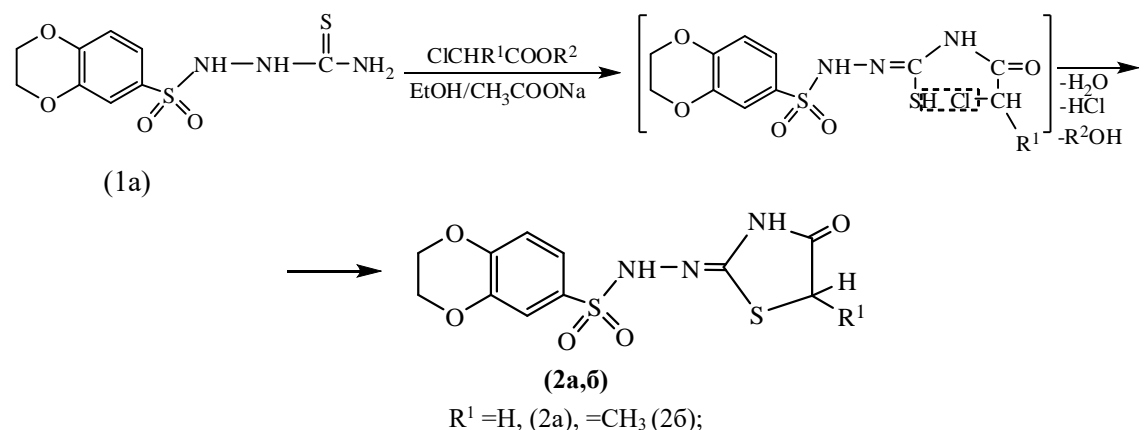
Модификацией этого способа является бромирование оксикетонов. Полученные таким образом  $\alpha$ -бромпроизводные кардинально меняют направление реакции, открывая путь к получению соединений типа 1,3,4-тиадиазинового ряда.

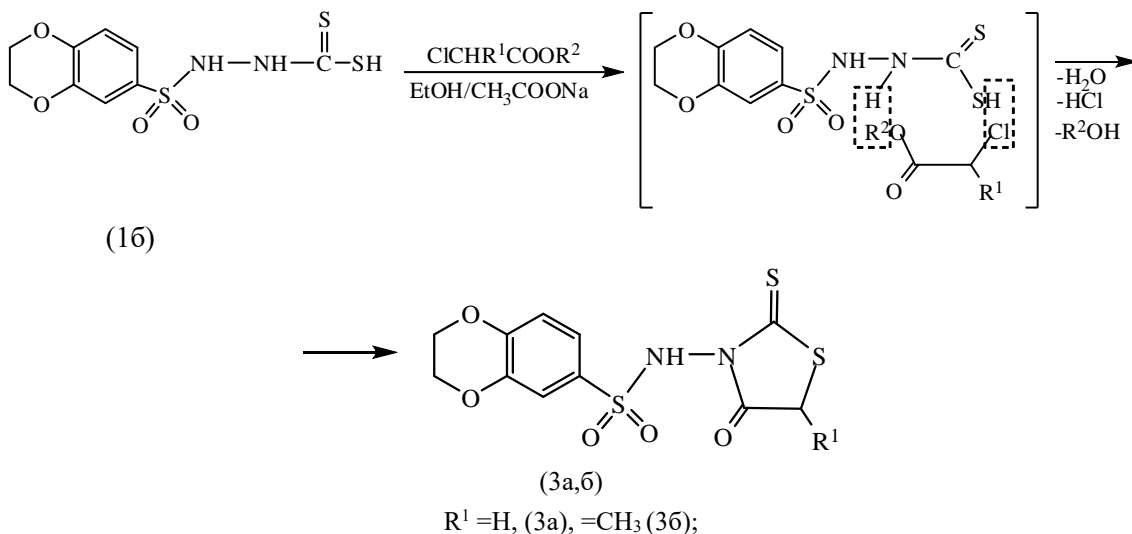
В продолжении исследований, направленных на поиск путей синтеза новых представителей класса тиазолидиновых и тиадиазиновых гетероциклови расширения таким образом банка данных, касающегося биологической активности и стереохимии данного класса соединений для построения зависимости в ряду «структура – активность» проведен цикл синтетических работ в этом направлении.

В связи с этим, в настоящей работе в качестве исходного для проведения синтетических работ выбран 1,4-бензодиоксан, который планировалось «привязать» к тиазолидиновому и тиадиазиновому циклу.

Для этого на начальной стадии получены 6-тиосемикарбазидосульфонил-1,4-бензодиоксан (1a) путём взаимодействия тиосемикарбазида на 6-сульфохлорида-1,4-бензодиоксана, а также взаимодействием на 6-ацетил-1,4-бензодиоксана (1б) ацетил хлористого в сухом толуоле в присутствии катализатора: безводного трёххлористого алюминия, как представлено в работе [8-9].

С целью поиска альтернативных биологически активных веществ в ряде исследуемых гетероциклов, а также для выяснения вопроса электронного влияния 2-сульфонамидо-1,4-бензодиоксанового фрагмента на активности тиазолидиновых гетероциклов, нами проведена попытка синтезировать N- и S-содержащих гетероциклов, с сопряженными 1,4-бензодиоксановыми фрагментами, по схеме:





Конечными продуктами такой реакции являются 2-имино-(2-сульфамидо-1,4-бензодиоксанил)-1,3-тиазолидин-4-оны (2а,б) и N(3)-сульфамидо-1,4-бензодиоксанил)-1,3-тиазолидин-2-тионы(3а,б). Выход целевых продуктов составляет не менее 74%.

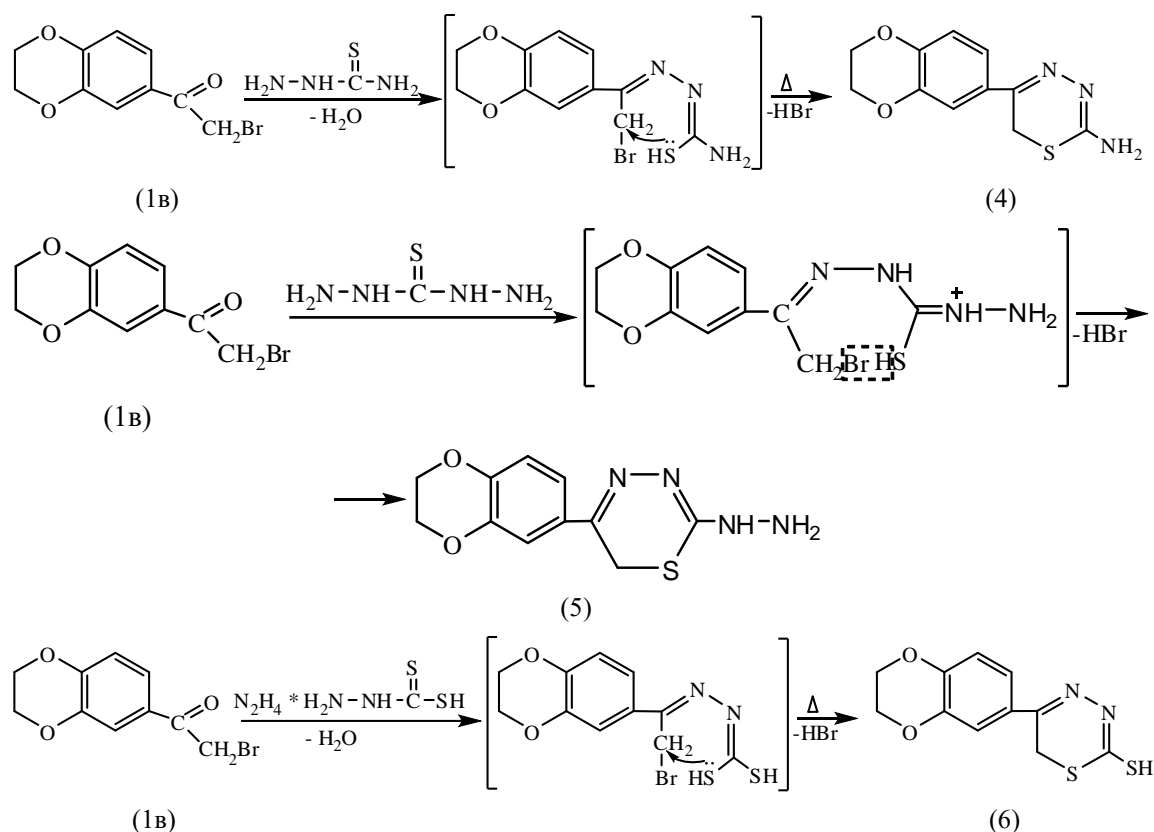
В ИК - спектрах соединений (2-3) отмечено появление новых полос поглощения в областях 1250, 1494, 1740 и 3400 -3136  $\text{см}^{-1}$ , характерных для колебаний (C=S), (N-N), (C=O от тиазолидина) и (NH) связей. Это подтверждает циклоконденсацию N(1) и N(2) атомов азотатиосемикарбазидного фрагмента исходных сульфамидо-1,4-бензодиоксана (1а) с электрофильными реагентами. Состав полученных соединений (2-3) подтвержден также данными элементного анализа.

В спектре ЯМР  $^1\text{H}$  у соединений (2-3а) обнаруживаются новые дублет-дублетные сигналы в области 3.82 м.д., соответствующие к двум протонам ( $\text{CH}_2$ ) групп тиазолидинового цикла и синглеты при 9.7 м. д. и 10.2м. д. для  $\text{NH}$  групп одному протону эндоциклического и экзоциклического атома азота. В случае (2-3б) дополнительно обнаружен новый дублет в области 1.53 м. д., соответствующий 3 протонам, для  $\text{CH}_3$  групп от (C5) цикла.

Для выяснения степени влияния тиазолидинового цикла на электронное состояние бенздиоксанового фрагмента проведен квантовохимический расчет синтезированных соединений. По этим данным наблюдается способность тиазолидинового цикла и сульфогруппы к передаче электронов в ароматическое кольцо 1,4-бензодиоксанового гетероцикла и большая энергетическая стабильность синтезированной молекулы (2-3), включающих тиазолидиноый цикл по сравнению с молекулами в открытой цепи.

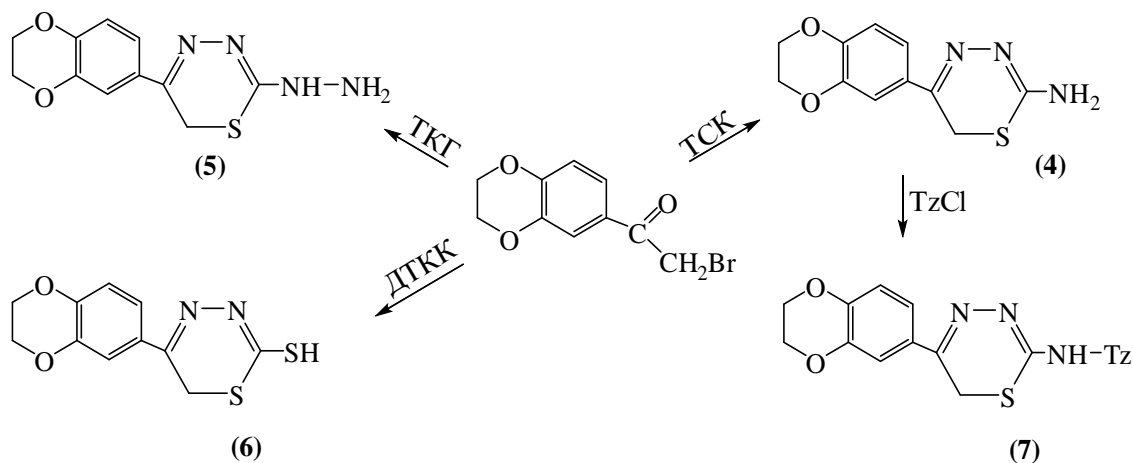
Далее по аналогии с оксикетонами [4-7] с целью функционализации ацетильного фрагмента в 5-ом положении 1,4-бензодиоксана [9] бромированием метильной группы ацетильного фрагмента получен 6- $\alpha$ -бромацетил-1,4-бензодиоксан (1б), который вовлечен далее в реакции с S, N-бифункциональными реагентами: тиосемикарбазидом (ТСК), дитиокарбаминовой кислотой (ДТКК) и тиокарбогидразидом (ТКГ).

Следует отметить, что полученный 6- $\alpha$ -бромацетил-1,4-бензодиоксан (1в), обладает высокой реакционной способностью за счет наличия C=O и -CH<sub>2</sub>Br углеродных электрофильных центров. В образование новых продуктов, в которых сопряженными являются два циклических фрагмента, вовлечены также атом брома и карбонильная группа 6- $\alpha$ -бромацетил-1,4-бензодиоксана (1в). Возможные пути направления реакции циклоконденсации, которая протекает путём внутримолекулярных замещений можно изобразить следующими схемами:



В результате нуклеофильных атак тиольной группы по бромуглеродному центру промежуточных продуктов формируется тиадиазиновый цикл с образованием ряда 6-(2-амино-, гидразино- и тиол-6Н-1,3,4-тиадиазин-5-ил)-1,4-бензодиоксанов(4-6), выход конечных продуктов при этом составляет не менее 80%.

С целью сравнительного исследования биологической активности полученных гетероциклов, используя свободную аминогруппу в случае соединения (4) путём взаимодействия с толуолсульфохлоридом получен 6-(2-толуолсульфамино-6Н-1,3,4-тиадиазин-5-ил)-1,4-бензодиоксан(7), как это представлено ниже на общей схеме (4→7).



Строение и состав полученных соединений подтверждён ИК-, ПМР спектрами и элементным анализом.

В ИК-спектрах новых синтезированных соединений (4-7) обнаружены характерные полосы поглощения для функциональных групп тиадиазинового кольца. Для соединений (4-5) отмечено появление новых полос поглощения в области  $3385, 3088 \text{ см}^{-1}$ , характерных для колебаний экзоциклических аминогрупп, при этом полоса поглощения в области  $600-700 \text{ см}^{-1}$ , характерна для C-SH связисоединения (6).

В ЯМР  $^1\text{H}$  спектре соединений (4-7) помимо сигналов протонов 1,4-бензодиоксанового кольца обнаружены новые сигналы в области 4.42 м.д. и 7.38 м.д. с интегральной интенсивностью, соответствующей 2 протонам, которые отнесены к метиленовым протонам в шестом положении тиадиазинового цикла и протонам экзоциклической аминогруппы, соответственно. В случае соединения (6) в области 13.28 м.д. обнаружен сигнал, эквивалентный одному протону, который нами отнесен к протону -SH группы. Протоны тозилльной группы наблюдаются в виде двух дублетов с КССВ  $J= 10 \text{ Гц}$  и химическим сдвигом 7.5-7.7 м.д., которые отнесены к протонам ароматического кольца. Сигнал в области 10.22 м.д. к протону замещенной NH группы. Состав полученных соединений подтвержден также данными элементного анализа.

Для выяснения вопроса степени взаимного влияния 1,4-бензодиоксанового и 1,3,4-тиадиазинового цикла проведен квантовохимический расчет их минимума энергии. Полученные данные свидетельствуют о наличии сопряжения электронов ароматического кольца 1,4-бензодиоксанового цикла с электронным облаком тиадиазинового цикла, что может в свою очередь влиять на конфигурационную устойчивость конечных продуктов: 5-(1,4-бензодиоксанил)-1,3,4-тиадиазинов.

Таким образом, данные ИК- и ПМР спектров свидетельствуют об однотипных реакциях внутримолекулярных атаках тиольных групп по галогенсодержащему углеродному центру с последующим нуклеофильным замещением с образованием тиазолидиновых и тиадиазиновых гетероциклов, сопряженных с 1,4-бензодиоксаном.

### Экспериментальная часть

ИК спектры веществ снимали на приборе UR-20 в таблетках с KBr тонким слоем в концентрации 1:200 мг и на приборе «Perkin-Elmer Spectrum-65» (в интервал 400-4000 см<sup>-1</sup>).

Температура плавления полученных новых соединений была измерена на микронагревательном столике «Voethius» с температурным шагом 4°C/мин<sup>-1</sup>.

Тонкослойной хроматографией контролировали чистоту полученных соединений на стандартных пластинках «SilufolUV-254» в системах растворителей бензол: спирт (2:1), спирт: хлороформ (3:1). Пятна на хроматограммах обнаруживали парами йода. Колоночную и тонкослойную хроматографию проводили на нейтральном Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, при этом в качестве элюента использовали – бензол- хлороформ-этанол 4:20:1. Контроль за ходом реакции осуществляли по исчезновению полос поглощения карбонильной C=O и – CH<sub>2</sub>Br связи исходных продуктов.

Элементный состав определен на приборе «Perkin-Elmer- 2400».

#### **Синтез 2-имино-(2-сульфамидо-1,4-бензодиоксанил)-1,3-тиазолидин-4-он (2а)**

В коническую колбу растворяли 2.89 г (10 ммоль) 6-тиосемикарбазидосульфонила 1,4-бензодиоксана (1а) в 40 мл 96%-ного этилового спирта при 60-70°C. При перемешивании на магнитной мешалке добавляли 0.95 г (10 ммоль) монохлоруксусной кислоты (МХУК) в присутствии 0.82 г (10 ммоль) ацетата натрия в спиртовом растворе и продолжали перемешивать. Выпавший осадок очищали посредством кипящего этанола (70 мл на 1 г вещества) с активированным углём и фильтровали. Растворитель удаляли при пониженном давлении, а остаток очищали путём колоночной хроматографии с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и получали 2.43 г (74%) (2а) с т. пл. 212°C (этанол), белые кристаллы.

Спектр ЯМР<sup>1</sup>H(ДМСО-D<sub>6</sub>)(δ, м.д.): 3.92 д. д (1 H, CH<sub>2</sub>J 4,5, 16 Гц), 4.06 д. д (1 H, CH<sub>2</sub>J 4,5, 16 Гц); 4.42 (4H, CH<sub>2</sub>); 7.25, 7.56, 7.62 (3H, H-аром); 9.74 с (1H, NH), 10.24 с (1H, NH).

ИК спектр (KBr), ν/см<sup>-1</sup>: 3220-3000 (NH), 1710 (C=O цикл.), 1620 (C=N), 642 (C-S), 1246-1195 (тиаз. цикл), 1381-1323 (C-C), 1581 (N-N), 1610, 1582, 1576 (C-C аром).

Найдено (%): C 41.16, H 3.42, N 12.83, S 19.56. C<sub>11</sub>H<sub>11</sub>N<sub>3</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub> (329.35).

Вычислено (%): C 40.11, H 3.36, N 12.76S 19.47.

#### **3-метил-2-имино-(2-сульфамидо-1,4-бензодиоксанил)-1,3-тиазолидин-4-он (2б).**

Получено по общей методике (2а) из 2.89 г (10 ммоль) 6-тиосемикарбазидосульфонила 1,4-бензодиоксана (1а) и 1.36 г (10 ммоль) этиловый эфир-1-метилмонохлоруксусной кислоты. Получали 2.47 г (72%) (2б) с т. пл. 206°C (этанол), белые кристаллы.

Спектр ЯМР<sup>1</sup>H (ДМСО-D<sub>6</sub>) (δ, м.д.): 2.34 с (3H CH<sub>3</sub>), 4.06 м.д. (1 H, CH<sub>2</sub>J 4,5, 16 Гц); 4.42 (4H, CH<sub>2</sub>); 7.25, 7.56, 7.62 (3H, H-аром); 9.74 с (1H, NH), 10.24 с (1H, NH).

ИК спектр (KBr), ν/см<sup>-1</sup>: 3222-3000 (NH), 1712 (C=O цикл.), 1620 (C=N), 642 (C-S), 1246-1195 (тиаз. цикл), 1381-1323 (C-C), 1581 (N-N), 1610, 1582, 1576 (C-C аром).

Найдено (%): C 41.97, H 3.81, N 12.23, S 18.67. C<sub>12</sub>H<sub>13</sub>N<sub>3</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub> (343.35).

Вычислено (%): С 42.01, Н 3.85, N 12.28S 18.72.

**N(3)-сульфамидо-1.4-бензодиоксанил)-1,3-тиазолидин-2-тион (3а).**

Получено по общей методике (2а) из 3.08 г (10 ммоль) 6-дитиокарбаминосульфо-нил-1,4-бензодиоксана (1б) и 0.95 г (10 ммоль) монохлоруксусной кислоты. Получали 2.69 г (75%) (3а) с т. пл. 218°C (этанол), белые кристаллы.

Спектр ЯМР<sup>1</sup>H (ДМСО-D<sub>6</sub>) (δ, м.д.): 3.92 м. д. (1 Н, СН<sub>2</sub>J 4,5, 16 Гц), 4.06 м.д. (1 Н, СН<sub>2</sub> J 4,5, 16 Гц); 4.42 (4Н, СН<sub>2</sub>); 7.25, 7.56, 7.62 (3Н, Н-аром); 9.74 с (1Н, NH).

ИК спектр (KBr), ν/см<sup>-1</sup>: 3018-3000 (NH), 1712 (C=O цикл.), 1620 (C=N), 642 (C-S), 1205 (C=S), 1246-1195 (тиаз. цикл), 1381-1323 (C-C), 1581 (N-N), 1610, 1582, 1576 (C-C аром).

Найдено (%): С 41.64, Н 3.82, N 12.18, S 18.56. C<sub>11</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>3</sub> (346.50).

Вычислено (%): С 41.59, Н 3.78, N 12.12S 18.50.

**N(3)-сульфамидо-1.4-бензодиоксанил)-5-метил-1,3-тиазолидин-2-тион (3б).**

Получено по общей методике (2а) из 3.08 г (10 ммоль) 6-дитиокарбаминосульфо-нил-1,4-бензодиоксана (1б) и 1.36 г (10 ммоль) этиловый эфир-1-метилмонохлоруксусной кислоты. Получали 2.73 г (76%) (3а) с т. пл. 214°C (этанол), белые кристаллы.

Спектр ЯМР<sup>1</sup>H (ДМСО-D<sub>6</sub>) (δ, м.д.): 2.36 с (3Н СН<sub>3</sub>), 4.05 м. д. (1 Н, СН<sub>2</sub>J 4,5, 16 Гц); 4.44 (4Н, СН<sub>2</sub>); 7.25, 7.56, 7.62 (3Н, Н-аром); 9.76 с (1Н, NH).

ИК спектр (KBr), ν/см<sup>-1</sup>: 3018-3000 (NH), 1712 (C=O цикл.), 1620 (C=N), 642 (C-S), 1205 (C=S), 1246-1195 (тиаз. цикл), 1381-1323 (C-C), 1581 (N-N), 1610, 1582, 1576 (C-C аром).

Найдено (%): С 40.02, Н 3.12, N 11.72, S 26.74. C<sub>12</sub>H<sub>11</sub>N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>3</sub> (360.43).

Вычислено (%): С 39.98, Н 3.07, N 11.65S 26.69.

**6-(2-Амино-6Н-1,3,4-тиадиазин-5-ил)-1,4-бензодиоксан (4).**

К раствору 2.57 г (10 ммоль) 2-(1,4-бензодиоксанил)-1-бромэтан-2-она (1в) в этанола (30 мл) прибавили 0.91 г (10 ммоль) тиосемикабазида (ТСК) в растворе спирт-вода 1:1 (150 мл), 1 мл конц. НВг и нагревали в течение 2 ч. Реакционную смесь нейтрализовали раствором NH<sub>4</sub>OH. Выпавший осадок очищали кипящим этанолом (70 мл на 1 г вещества) с активированным углём и фильтровали. Растворитель упаривали при пониженном давлении, а остаток очищали путём колоночной хроматографии с силикагелем. Получали 2.02 г (81%) с т. пл. 225°C соединения (4), белые кристаллы.

ИК спектр (KBr), ν/см<sup>-1</sup>: 1438 (C-N), 1508 (N-N), 1607 (C=N), 739 (C-S), 3200 (NH<sub>2</sub>), 1610, 1582, 1576 (C-C аром).

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H (СДCl<sub>3</sub>), (δ, м.д.): 4.04 с (2 Н, SCH<sub>2</sub>), 4.82 с (2Н, NH<sub>2</sub>), 4.04 (4Н, СН<sub>2</sub>), 7.25, 7.56, 7.62 (3Н, Н-аром);

Найдено (%): С 52.86, Н 4.82, N 16.84, S 12.85. C<sub>11</sub>H<sub>11</sub>N<sub>3</sub>O<sub>2</sub>S (250.15).

Вычислено (%): С 52.81, Н 4.78, N 16.79, S 12.81.

#### **6-(2-Гидразино-6Н-1,3,4-тиадиазин-5-ил)-1,4-бензодиоксан (5).**

Получено по общей методике (4) из 2.57 г (10 ммоль) 2-(1,4-бензодиоксанил)-1-бромэтан-2-она (1в) и 1.06г (10 ммоль) тиокарбогидразида (ТКГ). Получали 2.13 г (80.5%) (5) с т. пл. 231°C (этанол), белые кристаллы.

ИК спектр (KBr),  $\nu/\text{см}^{-1}$ : 1438 (C-N), 1508 (N-N), 1607 (C=N), 739 (C-S), 3200 (NH<sub>2</sub>), 1610, 1582, 1576 (C-C аром).

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H (CDCl<sub>3</sub>), (δ, м.д.): 4.06 с (2 H, SCH<sub>2</sub>), 4.82 с (2H, NH<sub>2</sub>), 10.2 с (1H, NH), 4.04 (4H, CH<sub>2</sub>), 7.25, 7.56, 7.62 (3H, H-аром);

Найдено (%): C 49.85, H 4.55, N 21.17, S 12.13. C<sub>11</sub>H<sub>11</sub>N<sub>3</sub>O<sub>2</sub>S (265.17).

Вычислено (%): C 49.82, H 4.51, N 21.13, S 12.09.

#### **6-(2-Тиол-6Н-1,3,4-тиадиазин-5-ил)-1,4-бензодиоксан (6).**

Получено по общей методике (4) из 2.57 г (10 ммоль) 2-(1,4-бензодиоксанил)-1-бромэтан-2-она (1в) и 1.40 г (10 ммоль) гидразиновый соль дитиокарбаминовой кислоты (ДТКК). Получали 2.13 г (80%) (6) с т. пл. 236°C (этанол), белые кристаллы.

ИК спектр (KBr),  $\nu/\text{см}^{-1}$ : 1438 (C-N), 1508 (N-N), 1607 (C=N), 739 (C-S), 3200 (NH<sub>2</sub>), 1610, 1582, 1576 (C-C аром).

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H (CDCl<sub>3</sub>), (δ, м.д.): 4.04 с (2 H, SCH<sub>2</sub>), 13.28 с (1H, SH), 4.04 (4H, CH<sub>2</sub>), 7.25, 7.56, 7.62 (3H, H-аром);

Найдено (%): C 49.51, H 4.11, N 10.84, S 24.05. C<sub>11</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, (267.15).

Вычислено (%): C 49.45, H 4.07, N 10.48, S 24.00.

#### **6-(2-Толуолсульфамино-6Н-1,3,4-тиадиазин-5-ил)-1,4-бензодиоксан (7)**

Растворяли 2.5 г (10 ммоль) 6-(2-Амино-6Н-1,3,4-тиадиазин-5-ил)-1,4-бензодиоксана(4) и 1.90 г (10 ммоль) п-толуолсульфохлорида в присутствии пиридина 30 мл 1,4-диоксана при нагревании до 80-90°C в течение 6 ч. Растворитель упаривали при пониженном давлении, а остаток очищали путём колоночной хроматографии с силикагелем. Получали 3.46 г (86%) соединения (7) с т. пл. 212°C, белые кристаллы.

ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$  1360-1185 (SO<sub>2</sub>), 1640 (C=N), 1438 (C-N), 1508 (N-N), 739 (C-S), 3200 (NH), 1610, 1582, 1576 (C-C аром).

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H (CDCl<sub>3</sub>), (δ, м.д.): 2.41 с (3H, CH<sub>3</sub> от Tz), 7.5- 7.7 д (4H, от Tz, J=1.0), 10.22 с (1H, NH), 4.04 (4H, CH<sub>2</sub>), 7.25, 7.56, 7.62 (3H, H-аром);

Найдено (%): C 53.61, H 4.29, N 10.46, S 15.93. C<sub>18</sub>H<sub>17</sub>N<sub>3</sub>O<sub>4</sub>S<sub>2</sub> (403.52).

Вычислено (%): C 53.58, H 4.24, N 10.42, S 15.90.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Исобаев М.Д., Абдуллаев Т.Х., Пулатов Э.Х., Хайдаров К.Х. – Изв. АН РТ, 1999, №1, с. 43-45.
2. Пат. 2259371 РФ МПК 2003113145/04; С07Д417/12, /04, А61Л31/549, А6137/02. Чупахин О.Н., Сидорова Л.П., Перова Н.М., Чарушин В.Н., Русинов Л.В., Муляр А.Г.: - заявл. 05.05.2003. - опубл. 27.08.2005.
3. Даукшас В.К. «1,4-бензодиоксан». – ХГС., 1975, № 9, с. 1155-1171.

4. Пулатов Э.Х., Исобаев М.Д., Мавлонов Б.Г. – Изв. РАН, сер. хим., 2016, №10, с. 2475-2478.
5. Пулатов Э.Х., Исобаев М.Д., Мавлонов Б.Г., Абдуллаев Т.Х. – Изв. РАН, сер. хим., 2018, №6, с.1106-1109.
6. Исобаев М.Д., Пулатов Э.Х., Абдуллаев Т.Х., Турдалиев М.З., Мавлонов Б.Г., Джумаева М. – Журн. Орг. хим, 2021, т. 57, № 3. с. 391-399. DOI: 10.31857/S0514749221030071.
7. Исобаев М.Д., Пулатов Э.Х., Мавлонов Б.Г., Абдуллаев Т.Х., Джумаева М., Рахимов И.Ф. – Изв. АН РТ, 2018, №4. с. 117-124.
8. Ташбаев Г.А., Тохиров Д.Д., Умаров С.А. – Вестник Таджикского национального университета, 2021, №4. с. 229-239.
9. Лapidус А.Л., Елисеев О.И., Бондаренко Т.Н., Остапенко Э.Г. Синтез органических соединений. – Москва, 2008, с.155.

Э.Х.ПУЛАТОВ, Д.Д.ТОХИРОВ, М.З.ТУРДИАЛИЕВ, Б.Г.МАВЛОНОВ, С.А.УМАРОВ

**ТИАЗОЛИДИНҲО ВА ТИАДИАЗИНҲОИ ПАЙВАСТШУДА  
БО 1,4-БЕНЗОДИОКСАН**

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти химияи ба номи В.И.Никитини АМИ Тоҷикистон*

Бо ҳамтаъсиркунии сульфохлорид- ва броматсетилбензодиоксан ба реагентҳои бинуклефилӣ ҳосилаҳои сулфамидӣ ва тиосемикарбазидии 1,4-бензодиоксанро ҳосил карда шуд. Ин ҳосилаҳои ҳосил кардашуда дар шароити муайян бо реагентҳои электрофилӣ гетеросиклҳои тиазолидини ҳосил мекунад, дар ҳолати ҳосилаи тиосемикарбазидӣ, ки дорони фрагменти  $\alpha$ -бромацетили дорад бо тавассути сиклоконденсатсияи дохилимолекулавӣ гетеросиклҳои тиадиазинӣ ҳосил мекунад.

**Калимаҳои калидӣ:** оксикетонҳо, сулфохлорид ва броматсетилбензодиоксанҳо, реагентҳои электрофилӣ ва бинуклеофилӣ, тиазолидинҳо, тиадиазинҳо.

E.Kh.PULATOV, D.D.TOKHIROV, M.Z.TURDIALIEV, B.G.MAVLONOV, S.A.UMAROV

**THIAZOLIDINE AND THIADIAZINE CONJUGATED  
WITH 1,4-BENZODIOXANE**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
V.I.Nikitin Institute of Chemistry*

By reacting sulfochloride- and bromoacetylbenzodioxane with binucleophilic reagents, the corresponding sulfamide and thiosemicarbazide derivatives were obtained. The resulting sulfamide derivatives under certain conditions with electrophilic reagents form thiazolidine heterocycles, in the case of a thiosemicarbazide derivative with a  $\alpha$ -bromoacetyl fragment, thiadiazine heterocycles are formed by intramolecular cyclocondensation.



**Key words:** oxyketones, sulfochloride and bromoacetylbenzodioxanes, electrophilic and binucleophilic reagents, thiazolidines, thiadiazines.

**Сведения об авторах:**

**Пулатов Элмурод Холикулович** – доктор химических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, главный научный сотрудник. E-mail: Pulod510@mail.ru

**Тохиров Джурабой Джурабоевич** – Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, старший научный сотрудник.

**Турдалиев Муроджон Зокирович** – кандидат химических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, старший научный сотрудник. E-mail: tmz-15@mail.ru

**Мавлонов Боронкул Гулмуродович** – Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, младший научный сотрудник. E-mail: boron-0589@mail.ru

**Умаров Саиданвар** - Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, соискатель. E-mail: anvar.8889@mail.ru

УДК 622.341.11

Специальность: 1.4.1 – Неорганическая химия

А.С.КУРБОНОВ, К.И.НЕМАТУЛЛОЕВ, С.М.ДОСАЕВ, Н.А.АШУРЗОДА,  
И.М.РАХИМОВ, М.М.ТАГОЕВ

**ПОИСК И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ  
ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХАРАНГОН**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт химии им.В.И.Никитина НАН Таджикистана  
Поступила в редакцию 12.09.2023 г.*

*В статье приведены химический и минералогический составы железосодержащих руд Таджикистана. Изучены их физико-химические свойства рентгенофазовым, дифференциально-термическим анализом. Определено процентное содержание минералов в руде магнетит месторождения Харангон. Показаны пути использования выделенных полезных компонентов.*

**Ключевые слова:** магнетит, серная кислота, химический состав, минеральный состав, Харангон.

Как известно, в наше время железо является основой чёрной металлургии, машиностроения, транспорта и других отраслей промышленности. Несмотря на то, что железо входит в состав почти 300 минералов, его добывают только из магнетита – магнитного железняка ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), сидерита ( $\text{FeCO}_3$ ) и лимонита или бурого железняка ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). В некоторых случаях промышленное значение приобретают и железосодержащие силикаты, например шамозит –  $(\text{Fe}_4\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_6n\text{H}_2\text{O}$  и др. [1-3].

Минералы железа выявлены во многих уголках Таджикистана. Но заслуживающие внимания месторождения находятся только в Согдийской области и в Варзобском ущелье. К их числу относятся Чокадамбулакское, Оккулакское, Туранглинское и Харангон. Большая часть этих месторождений связана со скарнами, и железо в них находится в составе магнетита [4, 5].

В настоящее время на Чокадамбулакском месторождении закончены геологоразведочные работы. Месторождение представлено крутопадающими залежами скарно-магнетитовых руд. Местами руды выходят на поверхность. Промышленные запасы, их около 60 млн. т., при среднем содержании железа около 40%. Установленные на этом месторождении относительно крупные запасы железной руды могут служить базой для развития

---

*Адрес для корреспонденции:* Нематуллоев Камараддин Изатуллоевич. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2, Институт химии им. В.И. Никитина НАНТ.  
E-mail: 909117111@mail.ru

черной металлургии в Средней Азии. Предусматривается получение чугуна из руд бездоменным способом с получением сопутствующих элементов – кобальта и висмута [4, 5].

В настоящей работе изучена возможность переработки железосодержащих руд Таджикистана. Особое внимание заслуживает месторождение Харангон, расположенное на территории Варзобского ущелья, по геологическим данным содержание магнетита в нём составляет более 63%. Изучены химический и минералогический составы некоторых железосодержащих руд Таджикистана.

В настоящей работе использованы следующие методы химического анализа: пламенная фотометрия, комплексометрия, аргентометрия и др.

Для определения щелочных металлов и кальция использован пламенный фотометр марки М425, также для определения химического состава руды использовали атомно-абсорбционный спектрометр серии АА-77.

РФА образцов проводили в автоматизированном многоцелевом порошковом рентгеновском дифрактометре XR Dynamic 500.

В табл.1 приведён химический и минералогический составы магнетитовой руды некоторых месторождений Таджикистана.

Таблица 1

Химический и минералогический составы магнетитовой руды месторождений Таджикистана

| Химический состав магнетитовой руды месторождения Харангон     |                                     |                                |                                |      |  |                   |                   |                  |                  |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Содержание, мас%   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·FeO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO                            | CaO  | TiO <sub>2</sub>   | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub>   | SiO <sub>2</sub> |                  |
|  | 63.91                               | 3.8                            | 5.98                           | 0.21 | 0.18   | 0.79              | 0.41              | 11.52            |                  |
| Минералогический состав  |                                     |                                |                                |      |  |                   |                   |                  |                  |
| Главные рудные минералы  |                                     |                                |                                |      | магнетит   |                   |                   |                  |                  |
| Второстепенные рудные минералы                                 |                                     |                                |                                |      | пирит, ярозит  |                   |                   |                  |                  |
| Редкие рудные минералы   |                                     |                                |                                |      | халькопирит  |                   |                   |                  |                  |
| Главные нерудные минералы                                      |                                     |                                |                                |      | хлорит, эпидот, серпентин, амфибол                                   |                   |                   |                  |                  |
| Второстепенные рудные минералы                                 |                                     |                                |                                |      | тальк, гипс, сера  |                   |                   |                  |                  |
| Химический состав магнетитовой руды месторождения Чокадамбулак |                                     |                                |                                |      |  |                   |                   |                  |                  |
| Содержание, мас%   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | FeO                            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | CaO  | TiO <sub>2</sub>  | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub>  | SiO <sub>2</sub> |
|  | 26.9                                | 15.9                           | 4.7                            | -    | 6.7  | 0.18              | -                 | -                | -                |
| Минералогический состав  |                                     |                                |                                |      |  |                   |                   |                  |                  |
| Главные рудные минералы  |                                     |                                |                                |      | магнетит, висмутин, гематит  |                   |                   |                  |                  |
| Второстепенные рудные минералы                                 |                                     |                                |                                |      | Пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, мушкетовит       |                   |                   |                  |                  |
| Редкие рудные минералы   |                                     |                                |                                |      | кобальтин, золото  |                   |                   |                  |                  |
| Главные нерудные минералы                                      |                                     |                                |                                |      | кварц, кальцит, геденбергит, гранат, хлорит, фтоклаз, пироксен и др. |                   |                   |                  |                  |
| Второстепенные рудные минералы                                 |                                     |                                |                                |      | доломит  |                   |                   |                  |                  |
| Химический состав магнетитовой руды месторождения Бувак        |                                     |                                |                                |      |  |                   |                   |                  |                  |
| Содержание, мас%   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·FeO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO                            | CaO  | TiO <sub>2</sub>   | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub>   | SiO <sub>2</sub> |                  |
|  | 68.0                                | 1.33                           | 0.25                           | 0.57 | 0.16   | 0.15              | 0.35              | 2.32             |                  |
| Минералогический состав  |                                     |                                |                                |      |  |                   |                   |                  |                  |
| Цветные минералы   |                                     |                                |                                |      | магнетит   |                   |                   |                  |                  |
| Главные минералы - спутники                                    |                                     |                                |                                |      | серпентин, кальцит   |                   |                   |                  |                  |

На рис.1 приведена рентгенограмма магнетитовой руды месторождения Харангон.

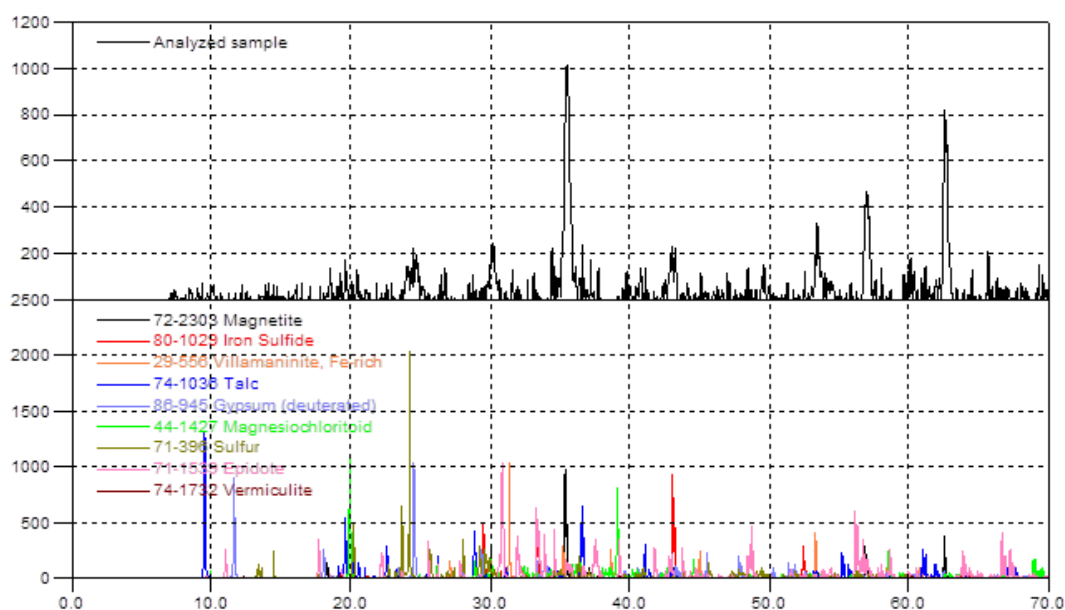


Рис. 1. Рентгенограмма магнетитовой руды месторождения Харангон.

Согласно РФА, магнетитовая руда месторождения Харангон содержит следующие минералы: магнетит –  $Fe_3O_4$ , пирит –  $FeS_2$ , халькопирит –  $(Cu, Fe)S_2$ , магниохлорит –  $(Mg, Fe)Al_2SiO_5(OH)_2$  и др. (табл.2).

Таблица 2

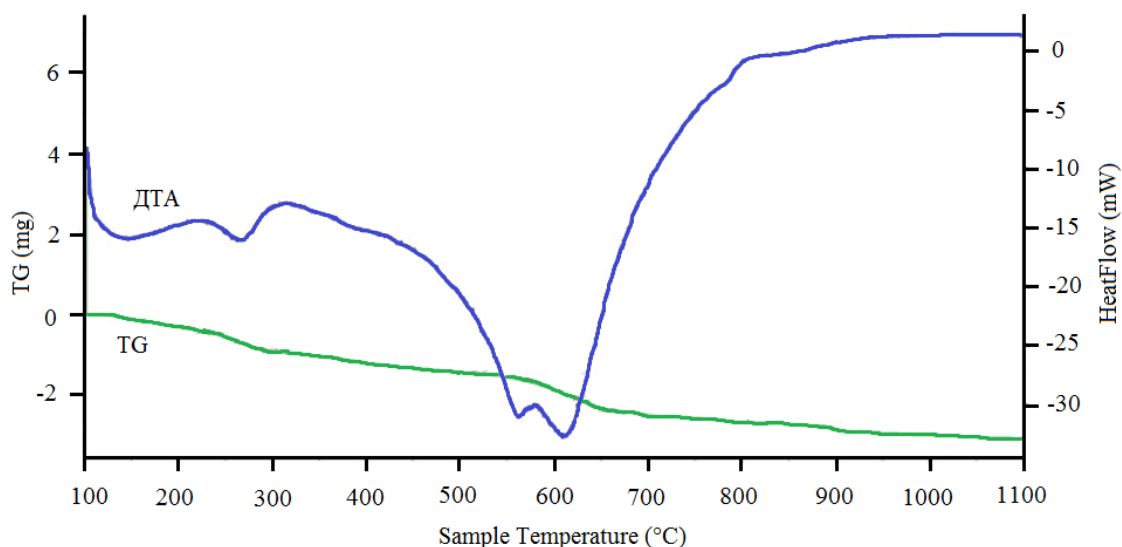
Содержание минералов в составе железосодержащих руд Таджикистана

| №  | Наименование минералов                       | Содержание минералов в составе руды (масс%) |
|----|--|---|
| 1. | Магнетит – $Fe_3O_4$                         | 64.2  |
| 2. | Пирит – $FeS_2$                              | 5.73  |
| 4. | Халькопирит – $(Cu, Fe)S_2$                  | 7.73  |
| 5. | Магниохлорит – $(Mg, Fe)Al_2SiO_5(OH)_2$     | 1,8   |
| 6. | Эпидот – $Ca_2Al_{2,60}Fe_{0,40}Si_3O_{13}H$ | 2.4   |
| 7. | Тальк – $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$               | 1,16  |
| 8. | Гипс – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$                  | 2.07  |

Для проведения ДТА использовали прибор Labsys Evo-1600. Это современный дериватограф, который совмещает в себе одновременное проведение термогравиметрии и дифференциально-сканирующей калометрии и обладает наилучшей чувствительностью и точностью анализа.

На рис. 2 представлены ДТА и TG магнетитовой руды месторождения Харангон, которые снимались при скорости нагрева  $10^\circ/\text{мин}$  до  $1100^\circ\text{C}$ . На кривых ДТА наблюдаются эндоэффекты при температурах 260, 570 и  $620^\circ\text{C}$ . Эндотермические эффекты в диапазоне температур  $225\text{-}310^\circ\text{C}$  со значительными потерями веса образца связаны с удалением физической, а также гидратной влаги из состава железосодержащего сырья. Эффекты при  $570^\circ\text{C}$

и 620°C могут соответствовать точкам Кюри, то есть происходит переход от ферромагнитной к парамагнитной фазе. При этих температурах магнитные материалы теряют свои ферромагнитные свойства и становятся парамагнетиками.



**Рис. 2.** Термограмма магнетитовой руды месторождения Харангон.

Магнетит месторождения Харангон разлагали 60% серной кислотой. Результаты изучения сернокислотного разложения предварительно обожжённой руды при температуре 600-700°C показывают, что степень извлечения железа составляет 70.2%.

Полученный раствор сульфатов железа является ценным реагентом для промышленности, который используется в деревообрабатывающей промышленности, для окрашивания различных изделий, для очистки вод, как катализатор и др.

Таким образом, железосодержащие руды Таджикистана являются ценным сырьём, и при разработке соответствующих технологических схем переработки этих руд можно получить ценные реагенты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аликберова Л.Ю., Кузьминых С.В., Попов В.А. (исторические сведения). Железо. – М.: Большая российская энциклопедия, 2004-2017.
2. Химическая энциклопедия в 5-и томах. Т.2. Гл. ред. И.Л.Кнунянц. – М.: Советская энциклопедия, 1990, с.270.
3. Карапетьянц М.Х., Дракин С.И. Общая и неорганическая химия: Учебник для вузов. – М.: Химия, 2000.
4. Геология СССР. Т.24. Таджикская ССР. – М., 1959, ч.1
5. Кошлаков В.Г. Этапы геологического изучения территории Республики Таджикистан. – Горный журнал, 2008, №6, с.29-37.

А.С.ҚУРБОНОВ, Қ.И.НЕМАТУЛЛОЕВ, С.М.ДОСАЕВ, Н.А.АШУРЗОДА,  
И.М.РАҲИМОВ, М.М.ТАҒОЕВ

**ЧУСТУЧУ ВА АРЗИШИ ИМКОНИЯТИ КОРКАРДАНИ МАЪДАНИ  
ОҲАНДОР ДАР ХОРАНГОН**

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти химияи ба номи В.И.Никитини АМИ Тоҷикистон*

Дар мақола таркиби химиявӣ ва минералогии маъданҳои оҳандори Тоҷикистон оварда шудааст. Хусусиятҳои физикӣ-химиявии онҳо тавассути таҳлилҳои рентгенофазаӣ ва гармии дифференсиалӣ омӯхта шуданд. Ҳиссаи массавии (бо %) минералҳо дар таркиби маъдани магнетити кони Харангон муайян карда шудааст. Роҳҳои истифодаи чузъҳои муфиди ба даст овардашуда нишон дода шудааст.

**Калимаҳои калидӣ:** магнетит, кислотаи сулфат, таркиби химиявӣ, таркиби минералогӣ, Харангон.

A.S.KURBONOV, K.I.NEMATULLOEV, S.M.DOSAEV, N.A.ASHURZODA,  
I.M.RAKHIMOV, M.M.TAGOEV

**SEARCH AND EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF PROCESSING  
IRON-CONTAINING ORES IN TAJIKISTAN**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
V.I.Nikitin Institute of Chemistry*

The article presents the chemical and mineralogical compositions of iron-bearing ores in Tajikistan. Their physicochemical properties were studied by X-ray phase and differential thermal analysis. The percentage of minerals in the magnetite ore of the Kharangon deposit was determined. The ways of using the selected useful components are shown.

**Key words:** magnetite, sulfuric acid, chemical composition, mineral composition, Kharangon.

**Сведения об авторах:**

**Қурбонов Амиршо Соҳибназарович** – доктор химических наук, Филиал Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАН Таджикистана в Хатлонском области, директор. E-mail: amirsho\_77@bk.ru;

**Нематуллоев Камарадин Изатуллоевич** – Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, докторант (PhD). E-mail: 909117111@mail.ru;

**Досаев Сухроб Махмадбилолович** – Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, младший научный сотрудник лаборатории комплексной переработки минерального сырья и промышленных отходов, соискатель. E-mail: suhrob.dosaev@mail.ru;

**Ашурзода Наимджон Амонкул** – кандидат технических наук, Бохтарский Государственный университет им. Носира Хусрава, доцент кафедры общей и неорганической химии. E-mail: naimjon2008@mail.ru;

**Рахимов Илхомиддин Мирзоевич** – кандидат технических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, заведующий лаборатории комплексной переработки минерального сырья и промышленных отходов. E-mail: rahimzod74@mail.ru;

**Тагоев Муродбек Махмадалиевич** – кандидат технических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, ведущий научный сотрудник лаборатории комплексной переработки минерального сырья и промышленных отходов. E-mail: murodbek.tagoev@mail.ru.

УДК 541.123.6

Специальность: 1.4.1 – Неорганическая химия

М.Т.ЖУМАЕВ, Д.СОЛИЕВ

**ИЗОТЕРМА ФАЗООБРАЗОВАНИЯ И РАСТВОРИМОСТЬ СИСТЕМЫ  
 $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  ПРИ 50°C**

*Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни*

*Поступила в редакцию 10.11.2023 г.*

*Рассмотрены результаты определения фазообразования и растворимости в невариантных точках системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при 50°C и строение ее диаграммы при данной температуре.*

**Ключевые слова:** изотерма, растворимость, диаграмма, геометрические образы, система.

Развитие химической промышленности, связанное с переработкой минерального сырья и получением новых материалов, требует знания соответствующих систем, для построения которых обычно используются методы физико-химического анализа, разработанного академиком Н.С.Курнаковым [1], его учениками и последователями.

Любая диаграмма состояния химических систем состоит из двух частей: координатный остов и фазовый комплекс. Фазовый комплекс химической диаграммы включает комплекс её геометрических образов (поля, кривые и точки), а координатный остов устанавливает параметры (положения) этих геометрических образов на диаграмме.

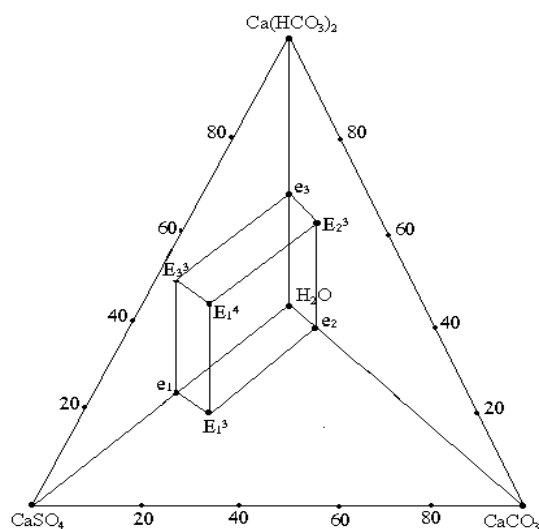
Исследуемая четырехкомпонентная система  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  является составной частью более сложной шестикомпонентной системы  $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{,HCO}_3\text{,F-H}_2\text{O}$  состояния фазовых равновесий в которой определяют условия утилизации жидких отходов алюминиевого производства. Сточные воды отделений регенерации криолита алюминиевых заводов содержат фториды, карбонаты, гидрокарбонаты и сульфаты натрия и кальция [2]. Процессы кристаллизации и растворения солей в водных растворах этих отходов определяются закономерностями фазовых равновесий в

---

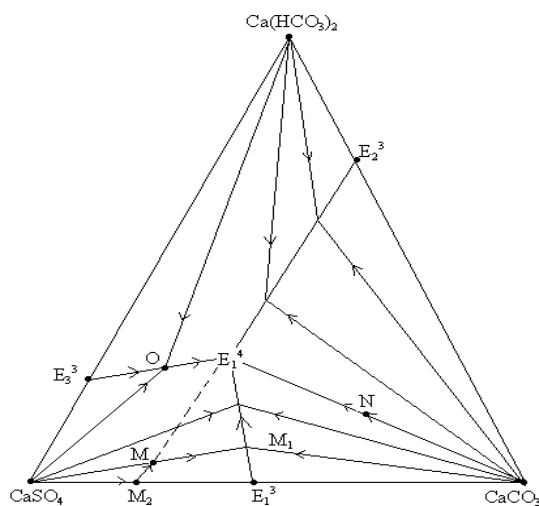
*Адрес для корреспонденции:* Жумаев Маъруфжон Тагоймуротович. 734003, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 121, Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни. E-mail: soliev.litfullo@yandex.com

шестикомпонентной системе  $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3,\text{F-H}_2\text{O}$ , составляющих её пяти- и четырехкомпонентных систем [3-5].

В настоящей работе рассмотрены результаты исследования системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$  методом растворимости с целью установления концентрационных параметров положения её геометрических образов и соотношения полей кристаллизации индивидуальных равновесных твёрдых фаз. Ранее [6] методом трансляции были установлены фазовые равновесия исследуемой системы и построена её фазовая диаграмма.



а)



б)

**Рис. 1.** Диаграммы фазового комплекса четверной системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$ , построенные методом трансляции: а) ортогональная проекция; б) перспективная проекция

На рис. 1а изображена ортогональная проекция изотермы фазового комплекса на солевое основание тетраэдра состава. На ортогональной проекции изотермы фазового комплекс мы видим следующие элементы:  $e_1, e_2, e_3$  – проекции точек, отвечающих составам



однонасыщенных растворов чистых солевых компонентов ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ );  $E_1^3E_1^4$ ,  $E_2^3E_1^4$ ,  $E_3^3E_1^4$  – проекции линий двойного насыщения относительно соответствующих двух фаз ( $\text{Gr}+\text{Cc}$ ,  $\text{Cc}+\text{CaG}$  и  $\text{Gr}+\text{CaG}$ );  $e_1-E_1^3-E_1^4-E_3^3-e_1$  – поле кристаллизации фазы  $\text{Gr}$ ;  $e_2-E_1^3-E_1^4-E_2^3-e_2$  – поле кристаллизации фазы  $\text{Cc}$ ;  $e_3-E_3^3-E_1^4-E_2^3-e_3$  – поле кристаллизации фазы  $\text{CaG}$ ;  $E_1^4$  – проекция состава трояконасыщенного раствора.

Перейдем теперь к описанию перспективной проекции из точки, отвечающей чистому растворителю  $\text{H}_2\text{O}$ , на основание пирамиды состава. На рис. 1б показано построение диаграммы с центральной проекции из вершины, отвечающей растворителю.

Так как пути кристаллизации на поверхностях однонасыщенных растворов лежат в плоскостях, проходящих через состав ИСК и одно из трёх ребер тетраэдра –  $\text{H}_2\text{O}-\text{CaSO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCO}_3$  или  $\text{H}_2\text{O}-\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , то эти пути проецируются в виде прямых. Они показаны на рис. 1б стрелками, указывающими изменение солевых составов насыщенных растворов при изотермическом испарении. Это является большим преимуществом центральной проекции.

Проследим для примера, пользуясь этой проекцией, испарение раствора, характеризующегося фигуративной точкой  $M$ . Так как эта фигуративная точка попадает в поле кристаллизации компонента  $\text{CaSO}_4$  ( $\text{CaSO}_4E_1^3E_1^4E_2^3\text{CaSO}_4$ ), то первым начинает кристаллизоваться именно этот компонент. При этом фигуративная точка раствора движется по прямой  $\text{CaSO}_4M_1$  от точки  $M$  к точке  $M_1$ , а состав данной фазы находится в точке  $\text{CaSO}_4$ . По достижении  $M_1$  начинается совместная кристаллизация компонентов  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{CaCO}_3$ , причем фигуративная точка раствора движется по кривой  $E_1^3E_1^4$  от точки  $M_1$  к эвтонической точке  $E_1^4$ , а суммарный состав данной фазы (смеси равновесных твёрдых фаз) – от точки  $\text{CaSO}_4$  до точки  $M_2$  на стороне  $\text{CaSO}_4\text{CaCO}_3$ . Наконец, по достижении жидкой фазы точки  $E_1^4$  кристаллизуются все три фазы  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Состав раствора на этом последнем участке изотермического испарения остаётся неизменным, а состав данной фазы меняется по прямой  $M_2E_1^4$  от точки  $M_2$  до точки  $M$ . Когда фигуративная точка данной фазы приходит в точку  $M$ , исчезает последняя капля эвтонического раствора.

Другая последовательность кристаллизации при изотермическом испарении наблюдается, когда исходный раствор находится на одной из нод –  $\text{CaSO}_4 E_1^4$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 E_1^4$  или  $\text{CaCO}_3 E_1^4$  (точка  $N$ ). В этом случае после первичной кристаллизации (компонент  $\text{CaCO}_3$ , состав донной фазы также равен  $\text{CaCO}_3$ ) сразу начинается третичная кристаллизация эвтонического раствора, состав данной фазы при этом меняется по прямой  $\text{CaCO}_3E_1^4$  от точки  $\text{CaCO}_3$  до точки  $N$ .

Третья последовательность кристаллизации возникает у растворов, находящихся на линиях моновариантного равновесия двух твёрдых и жидкой фаз –  $E_1^3E_1^4$ ,  $E_2^3E_1^4$  или  $E_3^3E_1^4$  (точка  $O$ ). В этих случаях кристаллизация начинается сразу с выделения двух твёрдых фаз, при дальнейшем изотермическом испарении состав жидкой фазы изменяется по линии  $E_3^3E_1^4$ , от точки  $O$  до точки  $E_1^4$ , состав данной фазы при этом перемещается приблизительно от точки  $E_3^3$  до точки  $O$ .

Четвертый способ кристаллизации характерен для тройного эвтонического раствора (точка  $E_1^4$ ). В этом случае отсутствует первичная и вторичная кристаллизации. Состав раствора и состав данной фазы до полного затвердевания находится в точке  $E_1^4$ .

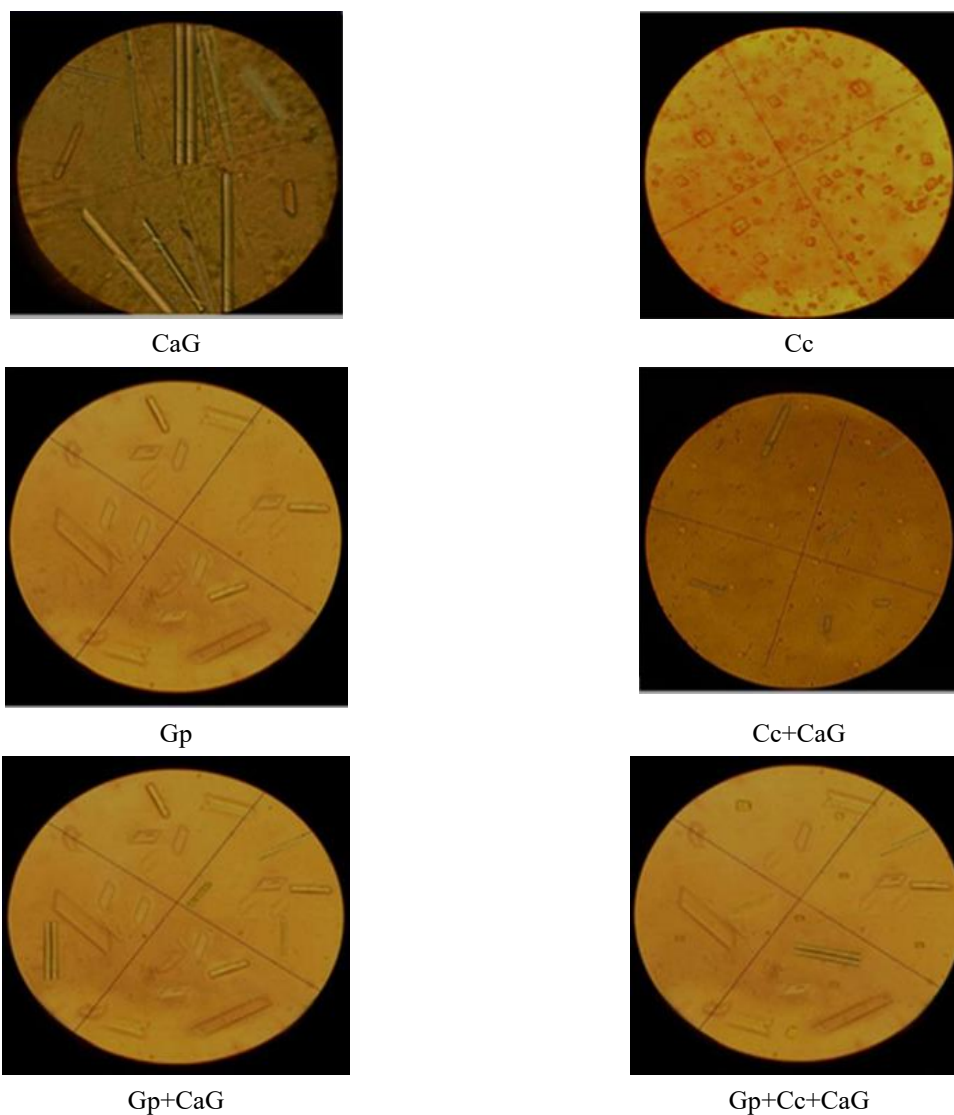
Равновесными твёрдыми фазами исследуемой системы при  $50^\circ\text{C}$  являются:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – гипс (Gp);  $\text{CaCO}_3$  – кальцит СС;  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  – кальций гидрокарбонат (CaG) [7, 8].

Для опытов были использованы следующие реактивы:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (хч);  $\text{CaCO}_3$  (ч);  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  (ч). Опыты проводили согласно методу донасыщения [9].

Исходя из данных литературы [7, 8] нами предварительно были приготовлены смеси осадков с насыщенными растворами, соответствующими инвариантным точкам составляющих исследуемую четырехкомпонентную систему трехкомпонентных систем:  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ ;  $\text{CaSO}_4\text{-Ca}(\text{HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  и  $\text{CaCO}_3\text{-Ca}(\text{HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$ . Затем, исходя из схемы трансляции инвариантных точек уровня трехкомпонентного состава на уровень четырехкомпонентного состава [6], приготовленные насыщенные растворы с соответствующими равновесными твёрдыми фазами, перемешивая, термостатировали при  $50^\circ\text{C}$  до достижения равновесия.

Термостатирование проводили в ультратермостате U-8. Перемешивание смеси осуществляли с помощью магнитной мешалки PD-09 в течении 50-100 часов. Температура поддерживалась с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  с помощью контактного термометра. За кристаллизацией твёрдых фаз наблюдали с помощью микроскопа «ПОЛАМ-Р 311». После достижения равновесия в системе равновесные твёрдые фазы сфотографировали цифровым фотоаппаратом «SONY-DSC-S500». Достижение равновесия устанавливалось по неизменности фазового состава осадков. Отделение жидкой и твёрдой фазы осуществляли с помощью вакуумного насоса через обеззоленную (синяя лента) фильтровальную бумагу на воронке Бюнера. Осадок, после фильтрации, промывали 96%-м этиловым спиртом и высушивали при  $120^\circ\text{C}$ . Химический анализ продуктов проводили по известным методикам [10-15].

Результаты кристаллооптического анализа [16] равновесных твёрдых фаз (микрофотографии) представлены на рис. 2, а результаты химического анализа насыщенных растворов приведены в табл. 1, где данные о растворимости для точек  $e_1\text{-}e_3$  и  $E_1^3\text{-}E_5^3$  незаимствованные из [7, 8].



**Рис. 2.** Микрофотографии равновесных твёрдых фаз системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$ .

Таблица 1

Растворимость в узловых (инвариантных) точках системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$

| № точек | Состав жидкой фазы, масс.% |                 |                      |                      | Фазовый состав осадков |
|---------|----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|------------------------|
|         | $\text{CaSO}_4$            | $\text{CaCO}_3$ | $\text{Ca(HCO}_3)_2$ | $\text{H}_2\text{O}$ |                        |
| $e_1$   | 0.2100                     | -               | -                    | 99.7900              | Gp                     |
| $e_2$   | -                          | 0.0054          | -                    | 99.9946              | Cc                     |
| $e_3$   | -                          | -               | 0.0145               | 99.9855              | CaG                    |
| $E_1^3$ | 0.1070                     | 0.0042          | -                    | 99.8888              | Gp+Cc                  |
| $E_2^3$ | -                          | 0.0047          | 0.0125               | 99.9828              | Cc+CaG                 |
| $E_3^3$ | 0.2580                     | -               | 0.0135               | 99.7285              | CaG+Gp                 |
| $E_1^4$ | 0.1940                     | 0.0063          | 0.0210               | 99.7787              | Cc+Gp+CaG              |

На основании полученных данных построена диаграмма растворимости системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$ , которая представлена на рис. 3. Положения неинвариантных точек уровня трехкомпонентного ( $E_n^3$ ) и четырехкомпонентного ( $E_n^4$ ) составов, где  $n$  – номера точек, на диаграмме установлены по массцентрическому методу [17].

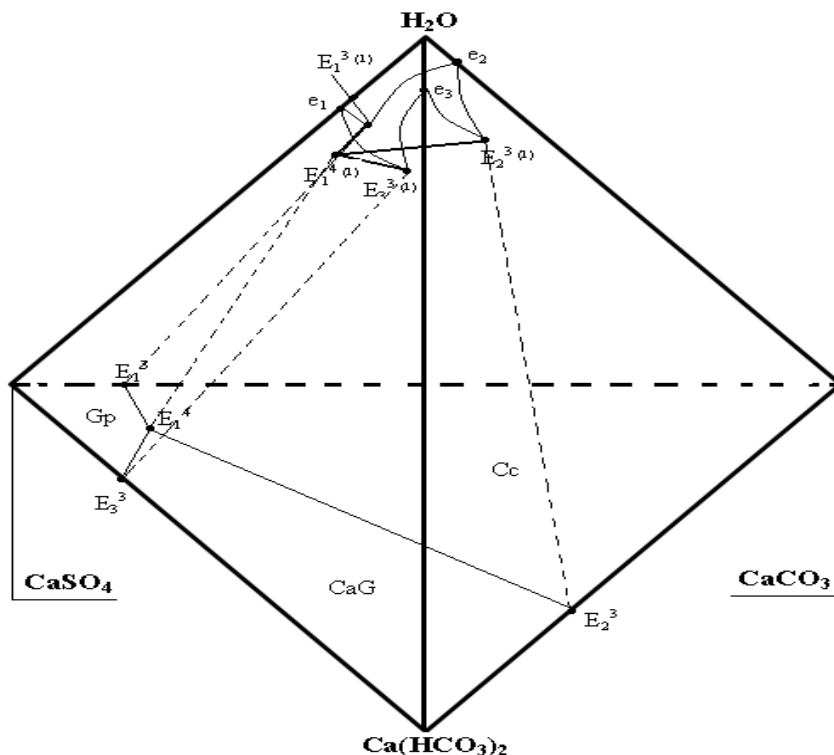


Рис. 3. Диаграмма растворимости системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 приведена диаграмма растворимости системы  $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$ , где отражено взаимное расположение и относительные размеры полей кристаллизации соответствующих равновесных фаз. Как следует из рис. 3 при  $50^\circ\text{C}$  в исследуемой четырёхкомпонентной системе поле кристаллизации кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ) занимает её значительную часть.

Описание содержания геометрических образов (поля, кривые, точки) рис. 3. приведены в табл. 2.

Таблица 2

Описание содержания геометрических образов на рис. 3.

| Обозначения геометрических образов | Содержание   |
|------------------------------------|--|
| <b>1</b>                           | <b>2</b>   |
| $e_1$                              | Растворимость сульфата кальция в воде  |
| $e_2$                              | Растворимость карбоната кальция в воде   |
| $e_3$                              | Растворимость гидракарбоната кальция в воде  |
| $E_1^3$                            | Точка совместной кристаллизации Gr+Cc в системе $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ |

| 1  | 2  |
|--|--|
| $E_2^3$  | Точка совместной кристаллизации CaG + Cc в системе CaCO <sub>3</sub> -Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O                         |
| $E_3^3$  | Точка совместной кристаллизации Gr + CaG в системе CaSO <sub>4</sub> -Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O                         |
| $E_1^4$  | Точка совместной кристаллизации Gr + Cc + CaG в системе CaSO <sub>4</sub> -CaCO <sub>3</sub> -Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O |
| $E_1^3$ — $E_1^4$  | Кривая совместной кристаллизации Gr + Cc в системе CaSO <sub>4</sub> -CaCO <sub>3</sub> -Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O      |
| $E_2^3$ — $E_1^4$  | Кривая совместной кристаллизации CaG + Cc в системе CaSO <sub>4</sub> -CaCO <sub>3</sub> -Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O     |
| $E_3^3$ — $E_1^4$  | Кривая совместной кристаллизации Gr + CaG в системе CaSO <sub>4</sub> -CaCO <sub>3</sub> -Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O     |
| $E_1^3$ CaSO <sub>4</sub> $E_3^3$ $E_1^4$ $E_1^3$                  | Поле кристаллизации Gr   |
| $E_2^3$ CaCO <sub>3</sub> $E_1^3$ $E_1^4$ $E_2^3$                  | Поле кристаллизации Cc   |
| $E_3^3$ Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> $E_2^3$ $E_1^4$ $E_3^3$ | Поле кристаллизации CaG  |

Таким образом, результаты исследования растворимости в системе CaSO<sub>4</sub>-CaCO<sub>3</sub>-Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O при 50°C и построение её диаграммы показывают, что поле кристаллизации Cc – (CaCO<sub>3</sub>), при данных условиях занимает значительную часть диаграммы, что связано с ее малой растворимостью. Полученные данные могут быть использованы при регенерации жидких отходов промышленного производства алюминия, содержащих сульфаты, карбонаты и гидрокарбонаты кальция.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курнаков Н.С. Введение в физико-химический анализ. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1940, 652с.
2. Мирсаидов У.М., Азизов Б.С., Сафиев Х.С., Рузиев Д.Р. Комплексная переработка отходов производства алюминия с местным минеральным сырьем. Цветные металлы. – М., № 4, 2003, с. 49-51.
3. Азизов Б.С., Сафиев Х. С., Рузиев Д.Р. Комплексная переработка отходов производства алюминия. – Душанбе: Эр-Граф, 2005, 150 с.
4. Азизов Б. Физико-химические и технологические основы комплексной переработки жидких и твердых отходов производства алюминия. Автореферат диссертации доктора технических наук. 2002, 51 с.
5. Рузиев Дж.Р. Физико-химические и технологические основы комплексной переработки отходов алюминиевого производства и алюмосиликатного сырья. Автореферат диссертации доктора технических наук. 2009, 50 с.
6. Солиев Л., Жумаев М.Т. Диаграмма фазовый комплекс системы Na,Ca|SO<sub>4</sub>,CO<sub>3</sub>,HCO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O при 50°C. – Известия НАН Таджикистана, Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. н., 2020, № 3(180), с.104-113.
7. Справочник экспериментальных данных по растворимости многокомпонентных водно-солевых систем. – СПб.: Химиздат, 2003, т.1., кн. 1-2. 1151 с.
8. Справочник экспериментальных данных по растворимости многокомпонентных водно-солевых систем. – СПб.: Химиздат, 2004, т.П., кн. 1-2, 1247 с.
9. Горощенко Я.Г., Солиев Л., Горников Ю.И. – Укр. хим. журн, 1987, т.53, №6, с. 568.

10. Золотов Ю.А., Дорохова Е.Н., Фадеева В.И. и др. Основы аналитической химии. Кн. 1. – М.: 2004, 361 с.
11. Золотов Ю.А., Дорохова Е.Н., Фадеева В.И. и др. Основы аналитической химии. Кн. 2. – М.: 2004, 503 с.
12. Лебедев М.И. Аналитическая химия – Тамбов, 2008, 160 с.
13. Крешков А.П. Основы аналитической химии. – Л.: Химия, 1970, т. 2. 456 с.
14. Анализ минерального сырья. Под общ. ред. Книпович Ю.Н., Морачевского Ю. В. – Л.: Госхимиздат, 1959, 947 с.
15. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод. – М.: Недра, 1970, 488 с.
16. Татарский В.Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод анализа веществ. – Л.: Изд. ЛГУ, 1948, 268 с.
17. Горощенко Я.Г. Массцентрический метод изображения многокомпонентных систем. – Киев: Наукова думка, 1982, 264 с.

М.Т.ЖУМАЕВ, Л.СОЛИЕВ

**ИЗОТЕРМАИ ФАЗАҲОСИЛШАВӢ ВА ҲАЛШАВАНДАГИИ СИСТЕМАИ  
CaSO<sub>4</sub>-CaCO<sub>3</sub>-Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O ДАР 50°C**

*Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи С.Айнӣ*

Ҷазаҳосилшавӣ ва ҳалшавандагӣ дар нуқтаҳои инвариантии системаи CaSO<sub>4</sub>-CaCO<sub>3</sub>-Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O дар 50°C муайян карда шуда, диаграммаҳои онҳо дар ҳарорати додашуда сохта шудааст.

**Калимаҳои калидӣ:** изотерма, ҳалшавандагӣ, диаграмма, элементҳои геометрӣ, система.

М.Т.ЖУМАЕВ, L.SOLIEV

**ISOTHERM OF PHASE FORMATION AND SOLUBILITY  
OF THE CaSO<sub>4</sub>-CaCO<sub>3</sub>-Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O SYSTEM AT 50°C**

*S.Aini Tajik State Pedagogical University*

The results of determining phase formation and solubility at invariant points of the CaSO<sub>4</sub>-CaCO<sub>3</sub>-Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system at 50°C and the structure of its diagram at this temperature are considered.

**Key words:** isotherm, solubility, diagram, geometric images, system.

**Сведения об авторах:**

**Жумаев Маъруфжон Тагоймуротович** – кандидат химических наук, Таджикский государственный педагогический университет им. С.Айни, зав. кафедрой «Общая и неорганическая химия». E-mail: soliev.litfullo@yandex.com.

УДК 546.11-620.93

Специальность: 1.4.1 – Неорганическая химия

А.ШАРИФОВ, У.М.МИРСАИДОВ, А.МУРОДИЁН, М.А.ШОДМОНОВА, Х.А.ХУСАЙ-  
НОВ

## РЕСУРСЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ТАДЖИКИСТАНЕ

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 18.08.2023 г.*

*В статье анализируется возможность создания отрасли водородной энергетики Таджикистана с использованием местного потенциала сырьевых ресурсов. Определены имеющиеся проблемы и пути их решения.*

**Ключевые слова:** водород, химический реагент, энергоноситель, теплотворность, безотходное производство, зеленая экономика.

### Введение

Водород  $H_2$  легкий и самый распространённый химический элемент во Вселенной. При молекулярной массе в 2.016 г-моль  $H_2$  имеет теплотворность 120 мДж/кг, что соответственно в 3.59 и 4.43 раз больше теплотворности природного газа и каменного угля, при сжигании  $H_2$  превращается в воду.  $H_2$  также является высокоактивным реагентом в многочисленных химических реакциях разного характера.

Большая теплотворность и отсутствие вредных отходов при сжигании, а также неограниченный источник сырья делают водород в будущем основным энергоносителем для экономики многих стран мира. В связи с чем, в США, Китае, Японии, России, странах ЕС и др. выполняются многочисленные программы научно-исследовательских и производственных работ для развития новой отрасли – водородная энергетика, основа для создания зеленой экономики. Так, в Российской Федерации согласно “Концепции развития

---

*Адрес для корреспонденции:* Мирсаидов Ульмас Мирсаидович. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Айни 299/2, Институт химии им.В.И.Никитина НАНТ, E-mail: ulmas2005@mail.ru

водородной энергетики” объём экспорта  $H_2$  прогнозируется довести к 2050 году до 50 млн.т со стоимостью более 100 млрд. долларов США [1].

Область применения водорода охватывает энергетику, транспорт, быт людей, химико-металлургическую и другие отрасли промышленности, где благодаря его использованию ускорится научно-технический прогресс в экономике многих стран мира. Физическое состояние водорода характеризуется его существованием как отдельного газа, в связанном виде в составах химических веществ и как адсорбированного на так называемых носителях. Химически связанный водород находится в составах кислот, спиртов, полимеров, аммиака, карбамида и многих других веществ. Примером носителей водорода являются палладий и его сплавы, которые способны адсорбировать в себя большой объём  $H_2$ , чем их собственный объём [2]. В особых случаях водород хранится и применяется в жидком виде как криогенная жидкость [3].

В русле развития мировой экономики по использованию водорода в качестве зеленого энергоносителя Таджикистан должен создавать у себя отрасль водородной энергетики, для чего имеется достаточная потенциальная возможность страны. Этому обязывает объявленная государственная программа по созданию зеленой экономики [4].

### **Производство и применение водорода**

Производство водорода в промышленном масштабе широко развивалось, начиная с середины двадцатого века, и на его основе появилось производство аммиака, спиртов, полимеров, карбамида и многих других химических материалов. Более 50 лет в Таджикистане работает Вахшский азотно-туковый завод в г. Сарбанд по производству аммиака и карбамида.

Сырьевые источники для получения водорода безграничны: его получают в основном двумя способами: а) электролизом воды, где одновременно выделяется и чистый кислород; б) конверсионным превращением органических веществ (уголь, природный газ, нефть, растительность) в  $H_2$  и  $CO$ . В зависимости от способа производства и степени чистоты  $H_2$  делится на сорта: зеленый, голубой, розовый, серый, бурый. Объём производства водорода в мире по разным источникам оценивается в пределах до 100 млн.т в год, из которого всего до 2% составляет доля зеленого  $H_2$  со степенью чистоты 99.99%, получаемого электролизом воды [5].

Способы применения  $H_2$  зависят от потребности производства в определённой форме его физического существования: в стационарных отраслях промышленности, таких как энергетической, химической, металлургической и т.п., он используется чаще всего как чистый газ или связанный в составе химического соединения. Для автономного использования, например в транспортных средствах, обычно водород находится в составах веществ-носителей. В зависимости от физического состояния водорода реализуется соответствующая технология его использования в качестве реагента химических реакций или энергоносителя для получения тепла.



## Ресурсы Таджикистана для производства водорода

На существующем производстве водорода в Таджикистане на ВАТЗ в настоящее время используется узбекский природный газ, но газообеспечение предприятия является нестабильным, и оно меняется в зависимости от многих параметров. В тоже время наша страна имеет огромные сырьевые ресурсы для получения водорода конверсионным способом из угля и другого органического сырья и потенциальные возможности по гидроэнергетике для электролиза воды с получением зелёного водорода. Согласно [6], запасы угля в месторождениях страны составляют 4.5 млрд.т. Гидротехнические потенциалы Таджикистана оцениваются в 527 млрд. кВт-ч электроэнергии в год, и по ним страна занимает 8-ое место в мире [7].

Прямое сжигание угля является грязным химическим процессом, где при окислении 1 кг углерода С образуется 3.67 кг CO<sub>2</sub>, также, из-за многокомпонентности состава, ещё образуются газы CO, NO, SO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и др., и зола как минеральный отход. Обычно зола угля утилизируется в производствах строительных материалов, но выброс указанных газов в атмосферу образует «парниковый эффект».

Уголь в условиях нашей страны, где отсутствует добыча природного газа и нефти, может стать основным органическим сырьём для конверсионного способа производства водорода. Однако, согласно требованиям [8], применение угля как энергоноситель должно включать в себя использование его потенциальной тепловой энергии с сохранением экологической чистоты природы. Такое положение можно соблюдать, если следовать концепции, что «уголь первоначально является многокомпонентным природным сырьём для получения химических веществ, а затем энергоносителем для производства тепла» [9].

Согласно общепринятой классификации по «парниковому эффекту» Таджикистан входит в число экологически чистых стран, где количество выбрасываемого CO<sub>2</sub> в год меньше 1 т на душу населения, и общая доля страны в мировом масштабе составляет до  $3 \cdot 10^{-4}$  % [10]. Однако рост использования угля по традиционной схеме прямого сжигания в промышленности и для работы ТЭС, а также интенсивное развитие производства цемента, которое сейчас происходит, и где к количеству CO<sub>2</sub>, образующего при сжигании угля, ещё добавляется по 440 кг двуоксида углерода за каждую тонну используемого известняка CaCO<sub>3</sub>, может изменить положение Таджикистана в будущем по чистоте природы. Альтернативным способом предотвращения этого отрицательного фактора в развитии экономики страны может стать производство водорода из угля и его использование в качестве энергоносителя.

Другим потенциальным и эффективным способом производства водорода в условиях Таджикистана является электролиз воды. По разным данным себестоимость производства зеленого H<sub>2</sub> электролизом воды варьируется в пределах 2.35-4.8 долл. США/кг, это намного выше себестоимости получения H<sub>2</sub> конверсионными способами из органического сырья, что объясняется дороговизной электроэнергии в странах производителей водорода. С учётом того, что себестоимость получаемой электроэнергии на ГЭС значительно ниже,

чем на ТЭС, получение зеленого  $H_2$  методом электролиза в Таджикистане, где более 98% электроэнергии производится на ГЭС, особенно в летнее время года при избытке производимой электроэнергии, будет экономически оправданным и себестоимость производимого водорода будет намного ниже, чем вышеприведённые цифры.

Электролиз воды можно осуществить также с использованием энергии от солнечных и ветряных электроустановок. Однако, на территории Таджикистана не во всех регионах наблюдается постоянный сильный ветер, поэтому использование ветряных установок будет малоэффективным, в то же время автономные солнечные батареи во многих регионах могут эффективно работать круглый год.

Для развития водородной энергетики также необходимо иметь материально–техническую базу и высококвалифицированные кадры. В Таджикистане имеются много энергетических и промышленных предприятий, на базе которых можно организовать производство водорода. К ним можно отнести в первую очередь все гидроэлектростанции (ГЭС) страны, а также ВАТЗ (г. Сарбанд), предприятия системы ТалКО (гг. Яван и Турсунзода), ТЭС-2 (г. Душанбе), горно-металлургические предприятия, цементные и кирпичные заводы и многие другие. В общем, установки по производству водорода, особенно электролизным способом, можно установить на любом предприятии, где имеется хорошее водо- и энергоснабжение. А на ТЭС, на цементных и кирпичных предприятиях, где в качестве энергоносителя используется уголь, следует установить газогенераторы для получения  $H_2$  и других горючих газов ( $CO$  и  $CH_4$ ) по безотходным технологиям с утилизацией всех компонентов состава органического сырья.

Для подготовки специалистов по водородной энергетике имеются учебные заведения технического профиля. Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими, Энергетический и Горно-металлургический институты, филиалы российских вузов: Энергетический институт и Институт стали и сплавов способны готовить специалистов отрасли разного профиля.

Производство и применение водорода является наукоёмким процессом, поэтому организация целенаправленных научных исследований по получению водорода из местного сырья, способов его хранения и использования в конкретных производствах, являются необходимой частью развития отрасли в стране. Лабораторная и материально–техническая база соответствующих научных институтов НАНТ позволяют проведение широкомасштабных научных исследований по тематикам водородной энергетики. Научный задел таких исследований уже сделан учёными республики.

Начиная с 1970 г., в Таджикистане в Институте химии АН Тадж.ССР выполнены фундаментальные исследования в области энергоёмких веществ – водородсодержащих реагентов, открыты основные закономерности, определены характеристики взаимодействия водорода с лёгкими металлами.

Впервые проведено систематическое исследование фазовых равновесий в тройных системах «борогидрид непереходного металла – борогидрид переходного элемента –

растворитель». На основе этих исследований создан метод синтеза индивидуальных борогидридов металлов, который основан на использовании наиболее доступного и дешёвого реагента. По разработанному методу впервые получен ряд ранее неизвестных борогидридов металлов. Достоверность полученных результатов подтверждена детальным исследованием физико-химических свойств выделенных соединений [11-13].

Физико-химический анализ ряда систем на основе гидридных соединений алюминия позволил доказать существование сложных двойных гидридных комплексов, осуществить простой способ синтеза ранее неизвестных, или известных, но не выделенных в индивидуальном состоянии гепта-, гекса- и тетрагидроалюминатов щелочных и щёлочноземельных металлов с использованием бинарных гидридов – наиболее дешёвых и легко доступных источников гидридного водорода [13,14].

В последние годы в Таджикском техническом университете имени академика М.С.Осими были разработаны комплексные технологии газификации угля [15-18], основная суть которой объясняется упрощённой схемой, приведённой на рис. 1.

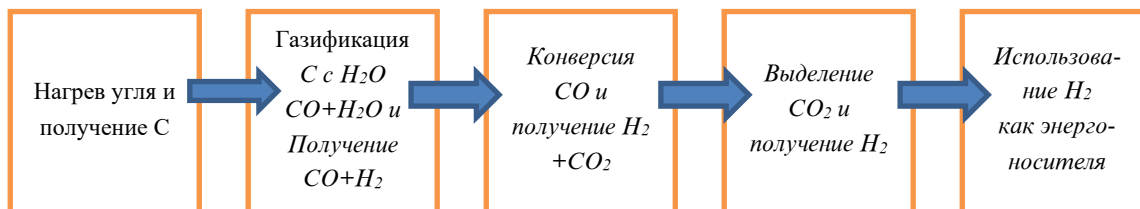


Рис. 1. Упрощённая технологическая схема переработки угля.

Согласно данным разработкам газифицируется только углерод, поэтому состав генераторного газа будет более чистым и зависит от вида окислителя и его количественного соотношения к углероду. При использовании водяного пара в качестве окислителя С образуется смесь  $H_2+CO$ , где при дальнейшей конверсии CO и выделения  $CO_2$  остаётся  $H_2$ , который применяется как энергоноситель или реагент химических реакций. Разумеется, что эти технологии требуют доработки и промышленного апробирования для определения точных параметров их осуществления при производстве водорода из угля.

### Перспективы развития водородной энергетики в Таджикистане

Использование водорода в качестве энергоносителя является более сложным процессом, чем использование угля или природного газа. Сложность процесса зависит от параметров состояния и свойств водорода. В таблице приведено сравнение параметров некоторых свойства  $H_2$  с параметрами широкоприменяемых энергоносителей.

Показатели свойств энергоносителей [19]

| Свойства энергоносителей                             | Водород | Метан    | Бензин    |
|--|---------|----------|-----------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                         | 0.0897  | 0.7143   | 700 – 780 |
| Температура самовозгорания, °С                       | 585     | 540      | 228 – 501 |
| Температура пламени, °С                              | 2045    | 1875     | 2200      |
| Концентрация взрываемости в воздухе, объём. %        | 4 – 75  | 5.3 – 15 | 1.0 – 7.6 |
| Минимальная энергия горения, мВт·с                   | 0.02    | 0.29     | 0.24      |
| Скорость распространения пламени в воздухе, м/с      | 2.65    | 0.4      | 0.4       |
| Коэффициент диффузии в воздухе, (см <sup>2</sup> /с) | 0.61    | 0.16     | 0.05      |

Как следует из данных таблицы, характеристики свойств водорода существенно отличаются от свойств метана и бензина. Малая плотность и высокая взрывоопасность, а также химическая активность по отношению ко многим материалам, усложняют процессы хранения и перевозки водорода в чистом виде и требуют разработки эффективных и безопасных систем хранения, транспортировки и использования – именно эти проблемы сдерживают развитие водородной энергетики в настоящее время [20].

Для использования водорода в качестве энергоносителя непригодны системы, применяемые в настоящее время при использовании природного газа или бензина. Из-за низкой плотности H<sub>2</sub> является высоколетучим газом, его хранение и транспортировка будут эффективными только при очень высоких давлениях до 100 МПа. Обеспечить надежность системы при таких давлениях возможно при использовании особо высокопрочных, но легких материалов с высокими коэффициентами конструктивного качества. В противном случае, масса оборудования для хранения и транспортировки водорода будет составлять основную массу системы, что делает использование водорода дорогим или даже неэффективным.

Разработкой способов и методов хранения, транспортировки и использования водорода в качестве энергоносителя и применяемых при этом материалов, оборудования и систем занимаются многие ведущие научно-исследовательские центры во многих странах мира [20-24]. Здесь мы не рассматриваем их. В то же время, для организации отрасли «водородной энергетики» в Таджикистане пока можно использовать те системы и оборудование по получению H<sub>2</sub> и его использованию, которые сейчас практически применяются в промышленности разных стран.

Прежде всего, необходимо перевести предприятия, потребляемые уголь в качестве энергоносителя, на потребление водорода из угля. Для этого достаточно разработать технологический узел по переработке угля в водород при утилизации сопутствующих углероду химических веществ. Такое производство будет аналогичным производству водорода на ВАТЗ с разницей в том, что вместо природного газа используется уголь. Технологию получения водорода из угля также можно внедрить и на ВАТЗ, тогда данное производство может работать и на местном сырье.

К крупным потребителям угля относятся ТЭС, например ТЭС-2 в г. Душанбе, все цементные и кирпичные заводы, алюминиевый завод, предприятия по переработке поликомпонентных руд и т.п. Перевод этих предприятий от использования угля к водороду не только способствует сохранению чистоты природы Таджикистана, но и позволяет увеличить их производственные мощности в соответствии с повышенной эффективностью водорода для энергообеспечения технологических процессов.

На предприятиях организация производства водорода электролизом воды будет более легко выполняемым процессом, чем получение  $H_2$  из угля. Для электролизного производства  $H_2$  промышленность многих стран выпускает электролизёры разных мощностей по производительности, позволяющие получить водород со степенью чистоты 99.99%. Но в дальнейшем, для оптимизации электролизного процесса и снижения себестоимости производства газов  $H_2$  и по совместительству  $O_2$ , требуется проведение исследований по определению малоэнергоёмких режимов электролизного процесса, оптимальных конструкций и размеров электролизёров, применения местных материалов, например сплавов алюминия, для разных устройств электролизёров и других вопросов технологического характера.

Перспективным направлением водородной энергетики в стране будет использование водорода в качестве высокоэффективного восстановителя в технологиях переработки поликомпонентных концентратов горных руд для извлечения из них необходимых металлов. Развитие данного направления водородной энергетики будет оправданным и эффективным с учётом того, что в настоящее время в Таджикистане сравнительно быстро развивается горнорудная промышленность для получения золота, серебра, свинца, меди, цинка, кремнезёма, алюминия и других компонентов составов руд. Параллельно можно развивать производство гидридов металлов, в частности гидроксида алюминия. Гидриды находят широкое применение в разных отраслях промышленности, на транспорте, в автономных энергетических установках и т.п.

### **Заключение**

Подытоживая, можно заключить, что ресурсы Таджикистана достаточны для организации и развития отрасли «Водородная энергетика» в стране. Область применения водорода огромна, и она охватывает все сферы экономики. Благодаря водороду и его соединениям, будет расширяться ассортимент получаемых материалов. Водород и его соединения будут ценными как для внутреннего потребления, так и для экспорта. Неиссякаемый потенциал водных ресурсов и запасы угля позволят успешно развивать новую отрасль для обеспечения потребности страны экологически чистым и высокоэффективным энергоносителем зелёной экономики.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации от 05 августа 2021 г., №2162р – [http:// static. government ru/node/media.files](http://static.government.ru/node/media.files).
2. Бакулин А.В., Кульков С.С., Кулькова С.Е. Абсорбция водорода на низкоиндексных поверхностях сплава PdFe. – Физика твёрдого тела. 2014, т.56, №6, с.1212-1220.

3. Карпов Д.А., Литуновский В.Н. Водородная энергетика: хранение водорода в связанном состоянии. – СПб: АО «НИИЭФА», 2016, 94с.
4. Стратегия развития «зелёной» экономики в Республике Таджикистан на 2023-2037 годы (Приложение 1 к постановлению Правительства Республики Таджикистан от 30 октября 2022 года) – [http://www.adlia.tj^show\\_doc](http://www.adlia.tj^show_doc).
5. Черневич С.В. Инновационные технологии в энергетике – зеленый водород. – Белорусский НТУ: Материалы СНТК-78 “Актуальные проблемы энергетики”, 2022, с.72-76.
6. Абдурахимов Б.А., Охунов Р.В. Угольная промышленность Таджикистана: сырьевая база, состояние, развитие и перспективы. – Душанбе: «Недра», 2011, 248 с.
7. Гидротехнические ресурсы Таджикистана. <https://www.mewr.tj>.
8. Киотский Протокол к Рамочной конвенции ООН об изменении климата. 1992, Парижское соглашение по климату 12.12.2015 /CNN Cable News Network, Tumer Broadcaising System Inc// Desember, 12.2015.
9. Шарифов А., Шодиев Г.Г., Субхонов Д.К. и др. Экологические проблемы использования угля в качестве теплоносителя и способы их решения. – Вестник ТТУ, 2015, №4(32), с.183-187.
10. Таджикистан: миллиард долларов на борьбу с CO<sub>2</sub> – <https://livingasia.online>.
11. Мирсаидов У.М. Синтез, свойства и химические превращения боро- и алюмогидридов металлов. – Душанбе: Дониш, 2005, 295 с.
12. Мирсаидов У.М. Алюмогидриды металлов. – Душанбе: Дониш, 2004, 86с.
13. Мирсаидов У.М. Синтез и свойства гидрида алюминия. – Душанбе: Дониш, 2004, 105 с.
14. Мирсаидов У.М. Борогидриды металлов. – Душанбе: Дониш, 2004, 140с.
15. Патенты РТ № 974 от 19.06.2018; №1051 от 16.05.2019; №1052 от 05.08.2019.
16. Патенты Евразии № 037398 от 24.04.2021; № 039523 от 7.07.2020.
17. Шарифов А., Хамроев Ф.Б., Шодиев Г.Г. Высокоэффективные технологии газификации угля. – Мат-лы респ науч.-практ. конф. «Наука – основа инновационного развития» – Душанбе, ТТУ, апрель 2020, с. 332-336.
18. Шарифов А., Гайбуллаева З.Х., Насимов Г.Т. и др. Безотходная технология газификации угля для получения тепла и химических веществ. – Горный журнал, 2022, №9, с.134-139.
19. Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф., Смирнова Л.П. Водород, свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справочник под ред. Д.Ю.Гамбурга и Н.Ф.Дубовкина. – М.: Химия, 1982, 672с.
20. Карпов Д.А., Литуновский В.Н. Водородная энергетика: хранение водорода в связанном состоянии. – СПб: АО «НИИЭФА». 2016, 94с.
21. Алексеева О.К., Самсонов Р.О., Фатеев В.Н. Системы хранения водорода. – Транспорт на альтернативном топливе, 2009, №5(11), с.77-79.
22. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, 229 с.
23. Фатеев В.Н., Алексеев О.К., Коробцев С.В. и др. Проблемы аккумулирования и хранения водорода. – Chemical Problems, 2018, №4(16), с. 453-483.
24. Хохонов А.А., Шайхатдинов Ф.А., Бобровский В.А. и др. Технологии хранения водорода. Водородные накопители энергии. – Успехи химии и химической технологии, 2020, т.34, №12, с.47-52.

А.ШАРИФОВ, У.М.МИРСАИДОВ, А. МУРОДИЁН, М.А.ШОДМОНОВА,  
Х.А.ХУСАЙНОВ

## ЗАХИРАҶО ВА ДУРНАМОИ РАВНАҶИ ЭНЕРГЕТИКАИ ГИДРОГЕНИ ДАР ТОҶИКИСТОН

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институту химияи ба номи В.И. Никитинӣ АМИ Тоҷикистон*

Дар мақола имконияти барпо намудани соҳаи энергетикаи гидрогени дар Тоҷикистон бо истифодаи захираҳои ашёии он таҳлил ёфтааст. Проблемаҳои мавҷуда ва роҳи ҳалли онҳо муайян карда шудаанд.

**Калимаҳои калидӣ:** гидроген, реагенти кимиёвӣ, энергиябаранда, гармидиҳӣ, истеҳсолоти бепартов, иқтисодиёти сабз.

A.SHARIFOV, U.M.MIRSAIDOV, A.MURODIYON, M.A.SHODMONOVA,  
H.A.KHUSAYNOV

## RESOURCES AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN ENERGY IN TAJIKISTAN

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
V.I.Nikitin Institute of Chemistry*

The article analyzes the possibility of creating a hydrogen energy industry in Tajikistan using the local potential of raw materials. The existing problems and ways to solve them are identified.

**Key words:** hydrogen, chemical reagent, energy carrier, calorific value, non-waste production, green economy.

### **Сведения об авторах:**

**Шарифов Абдумумин** – доктор технических наук, профессор, Институт химии им.В.И.Никитина НАН Таджикистана, главный научный сотрудник;

**Мирсаидов Ульмас Мирсаидович** – доктор химических наук, профессор, академик НАНТ, Институт химии им.В.И.Никитина НАН Таджикистана, главный научный сотрудник;

**Асрори Муродиён** – доктор технических наук, профессор, Институт химии им.В.И.Никитина НАН Таджикистана, главный научный сотрудник;

**Шодмонова Мадина Амонбоевна** – Институт химии им.В.И.Никитина НАН Таджикистана, магистр;

**Хусайнов Хусниддин Абдукаюмович** – Института химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана, соискатель.

УДК 621.791

Специальность: 1.4.4 – Физическая химия

Н.Х.ШАРАФОВ, А.МУРОДИЁН\*, Ф.ШОКИР, А.Г.САФАРОВ, К.БОТУРОВ,  
Ф.Р.ОДИНАЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ МЕСТНОГО СЫРЬЯ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Физико-технический институт им. С.У.Умарова*

*\*Государственное учреждение «Научно-исследовательский институт металлургии»  
ОАО «Таджикская алюминиевая компания»*

*Поступила в редакцию 01.05.2023 г.*

*В статье приводится большинство традиционных и нетрадиционных видов сырья, распространенных в Республике Таджикистан и используемых в качестве обмазочной массы для нанесения покрытия сварочных электродов. Исследовались пять различных составов обмазочной массы, которые изготавливались из местного минерального сырья и покрывались на поверхность стержней. В рамках исследованных материалов определен оптимальный состав покрытия обмазочной массы электродной проволоки.*

**Ключевые слова:** руда, минерал, каолин, бентонит, рутил, пирит, мрамор, марганец, вольфрам, электрод.

**Введение.** В первые годы после распада Союза промышленность Республики Таджикистан испытывала большие трудности – отдаленность от поставщиков сырья и материалов, большие транспортные расходы, а также неритмичность поставки оказали существенное влияние в падении производительности промышленных предприятий. В частности, в республике отсутствовало промышленное производство сварочных электродов любого вида, которые импортировались из близкого и дальнего зарубежья, в том числе из России, Турции, КНР и др., которые соответственно и стоили дорого. В начале XXI века (2000-2010 гг.) постепенно было налажено производство ручных дуговых

---

*Адрес для корреспонденции: Шарафов Начибулло Хайбуллоевич. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Айни, 299/1. Физико-технический институт им. С.У.Умарова НАНТ.  
E-mail: sharafov.najibullo@mail.ru*



сварочных электродов на импортном оборудовании и сырье для покрытия стержней (проволоки) дуговой сварки разного диаметра. Сварочные электроды, производимые таким образом, в силу дороговизны были неконкурентноспособными и реализовывались только на внутреннем рынке.

Цель настоящей работы заключается в представлении некоторых видов и запасов природных ресурсов и их химического состава, а также комплексного исследования физико-химических свойств руд и минералов на предмет пригодности использования их в производстве материалов покрытия стержня электродной дуговой сварки ручного назначения. Работа выполняется в рамках Постановления Правительства Республики “О переходе промышленности Республики Таджикистан на местные минеральные ресурсы” и ускоренной индустриализации страны в период 2022-2026 гг.

Таджикистан расположен практически в центральной части Евро-Азиатского континента, в узле величайших высокогорных хребтов: Тянь-Шаня, Гиндукуша, Куень-Луния, Каракорума и Гималаев, которые образуют уникальные геолого-фациальные структуры, охватывающие отложения всех геологических периодов от архея до современного (четвертичного) периода. Геолого-структурные и магматогенно-метаморфические процессы данного региона, способствовали образованию практически всех видов полезных ископаемых. На территории республики имеются практически все традиционные и нетрадиционные виды сырья такие как: каолины, бентониты, алуниты, нефелиновые сиениты, мусковит-ставролитовые, кианит-силлиманитовые, флюоритовые, сульфид-никелевые, вольфрамовые, титановые, железорудные, марганцовые, карбонатно-гипсовые и др. [1].

Состав покрытия, применяемый в качестве обмазочной массы, наносимый на поверхность электрода-стержня, сложный и многокомпонентный. Каждый компонент должен быть химически чистым и однородным, т.к. выполняет определенную функцию. В совокупности, компоненты покрытия должны обладать ионизирующими, газообразующими, шлакообразующими, легирующими, раскисляющими, связующими и формовочными свойствами [2-3].

Покрытия подразделяются на: **кислые** – в состав которых входят руды, содержащие гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), марганцевая руда типа ( $\text{MnO}_2$ ), алюмосиликаты (полевошпат –  $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{SiO}_2$ , каолин  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  и др.). **Рутиловые** – содержат до 45-50% рутилового концентрата ( $\text{TiO}_2$ ). Также в его состав входят слюда ( $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), карбонаты, например, магнезит ( $\text{MgCO}_3$ ) или мрамор ( $\text{CaCO}_3$ ). **Целлюлозные** – основным компонентом считается целлюлоза (до 50%) и далее добавляют в состав шихты рутил, карбонаты, алюмосиликаты и др. **Основные** – состоящие из карбонатов ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  и др.).

В качестве раскислителей в состав покрытия добавляют ферромарганец, ферросилиций, ферротитан или ферроалюминий. Бывает ещё кислород-целлюлозные, рутилово-основные, рутило-карбонатные, кислород-рутиловые, рутило-целлюлозные и другие покрытия.

**Экспериментальная часть.** Как известно, руды и минералы в природе не чистые, содержат влагу, примеси органического происхождения. Влага в составе минералов носит

адсорбционный и генетический характер, и они удаляются при определенных условиях термообработки. Это также касается органических примесей. Снятие РФА и ДТА позволяют определить чистоту руд и минералов, а также пределы температур обезвоживания и обессеривания с удалением различных примесей, что крайне важно для получения высокого качества сварного шва. Кроме прочего, ДТА определяет границы фазового перехода в самих минералах, что важно при сварочных процессах. В качестве примера, в данной статье приводятся РФА и ДТА двух минералов: Такобского флюорита и бентонитов района Кушониён.

На рис. 1 и 2 приведены, соответственно, рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) и дифференциальный термический анализ (ДТА) флюорита. Как видно из рис. 1 в составе флюорита присутствуют галенит (PbS) в количестве 28.1% (масс.), самого флюорита (CaF<sub>2</sub>) – 69.7% (масс.), и кварца – 2.2% (масс.). На ДТА (рис. 2) имеются максимумы (2 экзоэффекта), что по-видимому соответствует разложению CaCO<sub>3</sub> с образованием CaOSiO<sub>2</sub> и окислению галенита (PbS) с выделением сернистого газа (SO<sub>2</sub>).

На рис. 3 и 4 соответственно приведены РФА и ДТА бентонитов района Кушониён. Как видно из рис. 3, в состав бентонита входят: кварц (SiO<sub>2</sub>) – 79.91%(масс.); кальцит магния (Mg<sub>0.03</sub>Ca<sub>0.97</sub>)(CO<sub>3</sub>) – 13.10% (масс.) и доломит (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) – 6.98% (масс.). На кривой ДТА (рис. 4) обнаружен один экзоэффект, соответствующий температуре 750°C, который сопровождается частичным разложением бентонита с выделением CO<sub>2</sub>.

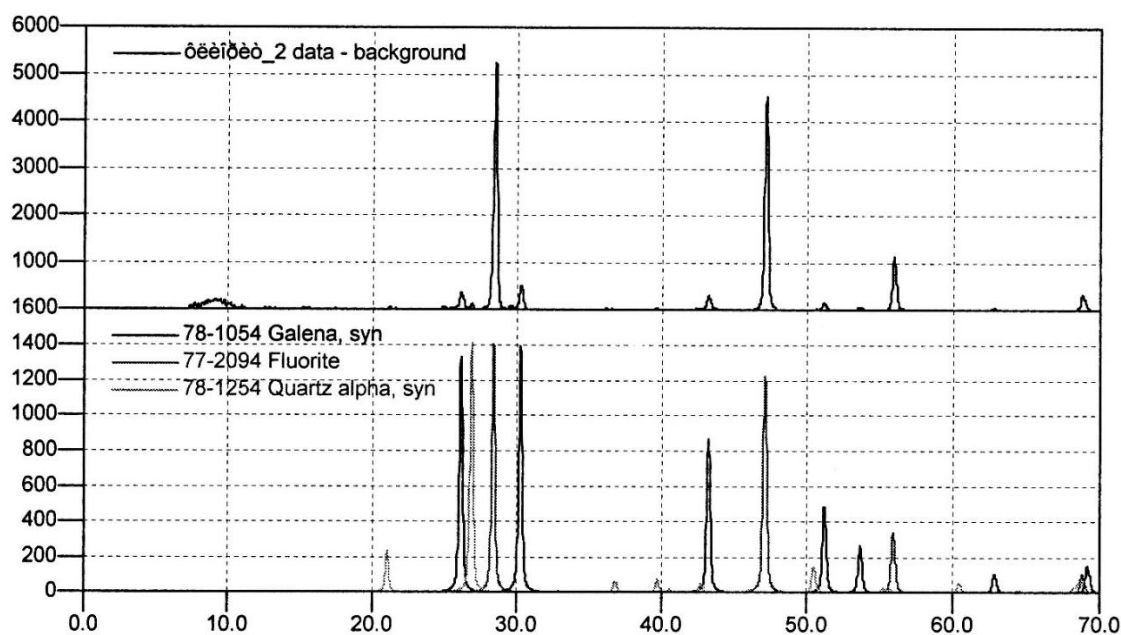
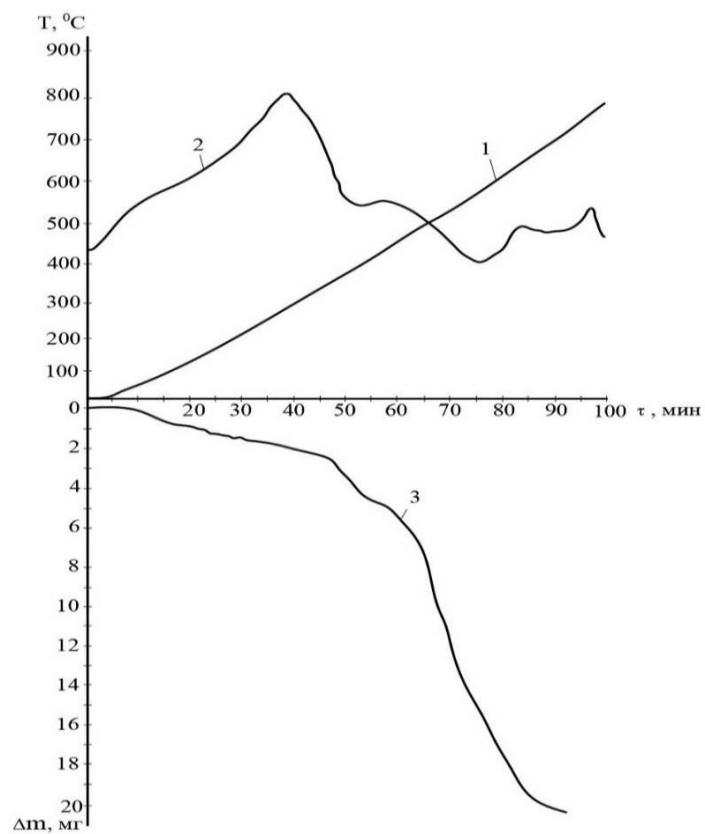
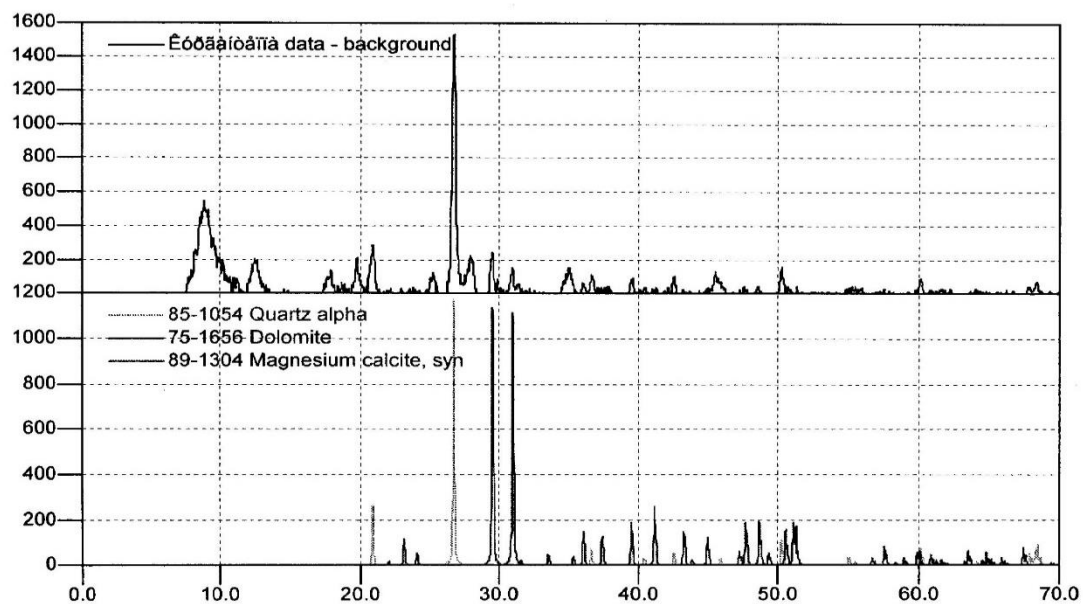


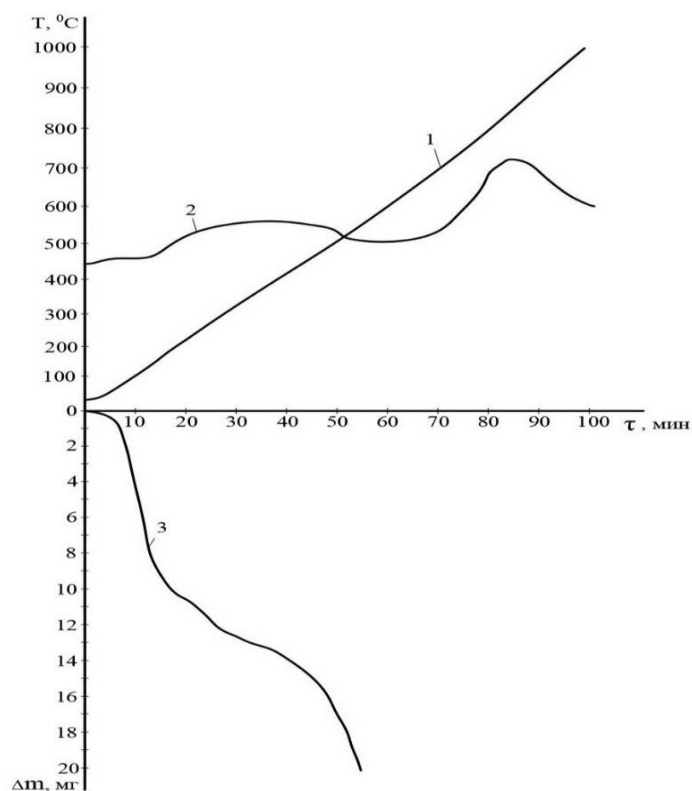
Рис. 1. Рентгенограмма флюорита Такобского месторождения.



**Рис. 2.** Дериватограмма флюорита Такобского месторождения: 1 – скорость изменения температуры; 2 – скорость потери массы флюорита; 3 – потеря массы флюорита.



**Рис. 3.** Рентгенограмма бентонита месторождения Кушониён.



**Рис. 4.** Дериватограмма бентонита месторождения Кушонийн: 1 – скорость изменения температуры; 2 – скорость потери массы бентонита; 3 – потеря массы бентонита.

Далее, на основе привозного стержня (проволоки) диаметра 3.2 мм подобраны составы обмазочной массы на основе местного минерального сырья. Был использован стержень марки С<sub>В</sub>-08А, а составы исследованной обмазочной массы в нескольких вариантах проведены в таблице.

Таблица

Исследованные составы покрытия, полученные на основе местного минерального сырья

| Варианты | Химический состав, %(масс.) |       |                  |                   |                   |  |
|----------|-----------------------------|-------|------------------|-------------------|-------------------|--|
|          | TiO <sub>2</sub>            | Fe-Mn | CaF <sub>2</sub> | CaCO <sub>3</sub> | MgCO <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O |
| 1        | 20                          | 30    | 40               | 10                | -                 | -  |
| 2        | 30                          | 15    | 20               | 20                | -                 | 15   |
| 3        | 40                          | 20    | 30               | -                 | 10                | -  |
| 4        | 50                          | 15    | 20               | -                 | 10                | 5  |
| 5        | 60                          | -     | 20               | -                 | 5                 | 15   |

В качестве связующего элемента в состав шихты добавлялось жидкое стекло в количестве 20% (масс.) от общей массы шихты. Приготовленная масса после смешивания прессовалась на поверхность проволоки на лабораторной установке с давлением 1.0 МПа. В данных экспериментах лучшее покрывающее свойство показал вариант 2 (таблица).

С помощью приготовленного сварочного электрода по варианту 2 ручным способом производилась дуговая сварка двух пластин из углеродистой стали (Ст.3) толщиной 5.0 мм, при которой качество сварки оказалось удовлетворительным. Результаты сравнивались с результатами работ, приведенных в [3]: сварочная дуга была длинная, интенсивная и шлакообразование происходило нормально и легко отделялось от поверхности сварочного шва. Более подробные справочные сведения о сварочных проволоках и состава обмазочной массы к ним для проведения дуговых сварок различных конструкций, приведены, например, в [2-3].

**Заключение.** Таким образом, в данной статье приводились некоторые типы месторождения, которые могут быть использованы в сварочном производстве. Распространение, геологическое происхождение, прогнозные и промышленные запасы руд и природных минералов подробно приведены в монографии [1]. При использовании флюорита Такобского месторождения (шахта «Центральная») возникает необходимость предварительного удаления серы, как нежелательного компонента в составе обмазочной массы, так как в процессе сварки  $SO_2$  наносит вред здоровью сварщика. В целом, для приготовления шихты покрытия необходимо предварительно удалить влагу, серу и фосфор (если имеются) из состава компонентов. В этом случае можно получить сварной шов высокого качества.

Необходимо отметить, что для каждого вида сварки, при которой применяют различные виды стержней, требуется своя обмазочная масса, режим термообработки покрытия, её сцепляемость с основой (стержня), характер образования дуги, шлакообразования и оптимизации состава шихты. Эти вопросы являются предметом дальнейших исследований авторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ёров З.Ё., Кабиров Ш.О., Муродиён А., Сироджев Н.М. Минерально-сырьевая база химико-металлургической промышленности Таджикистана. – Душанбе: Изд-во «Мега-Басым», Стамбул, 2012, 413с.
2. Чернышов Г.Г. Технология электрической сварки плавлением. – М: Издательский центр «Академия», 2006, 448с.
3. Чеканова Ю.В. Новые компоненты сварочных материалов с использованием сырья Кольского полуострова: кондиционирование, синтез и взаимодействие. – Дисс. на соиск. ученой степени канд. тех. наук. г. Апатиты, 2015, 157с.

Н.Х.ШАРАФОВ, А.МУРОДИЁН\*, Ф.ШОКИР, А.Г.САФАРОВ, К.БОТУРОВ,  
Ф.Р.ОДИНАЕВ

## ТАҲҚИҚИ РҶЙКАШ ДАР ЗАМИНАИ АШӢИ ХОМИ МАҲАЛЛӢ БАРОИ ЭЛЕКТРОДҲОИ КАФШЕРИ КАМОНӢ

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови,  
\*Муассисаи давлатии “Пажӯҳишгоҳи илми-таҳқиқотии металлургия”-и ҶСК  
“Ширкати алюминийи тоҷик”*

Дар мақола аксари навъҳои ашӢи хоми анъанавӣ ва ғайрианъанавӣ, ки дар Ҷумҳурии Тоҷикистон паҳн гаштаанд, ҳамчун массаи молиданӣ барои рӯйпӯш намудани электродҳои кафшерӣ истифода мешаванд, оварда шудаанд. Пайдоиши геологӣ, паҳншавӣ, таркиби химиявӣю минералогӣ ва захираҳои саноатии пешгӯишудаи онҳо нишон дода шудаанд. Панҷ таркиби гуногуни массаи молиданӣ, ки аз ашӢи хоми маъдани маҳаллӣ тайёр карда шуда, дар сатҳи тирҳо рӯйпӯш шудаанд, таҳқиқ карда шуданд. Дар доираи маводҳои таҳқиқшуда таркиби оптималии рӯйпӯши массаи молидани тирӣ электродӣ муайян карда шуд.

**Калимаҳои калидӣ:** маъдан, минерал, каолин, бентонит, рутил, пирит, мрамар, марганец, волфрам, электрод.

N.H.SHARAFOV, A.MURODIYON\*, F.SHOKIR, A.G.SAFAROV, K.BOTUROV,  
F.R.ODINAEV

## RESEARCH ON CATINGS FROM LOCAL RAW MATERIALS FOR ARC WELDINGELECTRODES

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
S.U.Umarov Physical-Technical Institute,  
\*State Institution «Research Institute of Metallurgy» OJSC «Tajik Aluminum Company»*

The article presents most of the traditional and non-traditional types of raw materials common in the Republic of Tajikistan and used as a coating mass for coating welding electrodes. Their geological origins, distribution, chemical and mineralogical compositions, predicted and commercial reserves are shown. Five different compositions of the coating mass were studied, which were made from local mineral raw materials and coated on the surface of the rods. Within the framework of the investigated materials, the optimal composition of the coating of the coating mass of the electrode wire was determined.

**Key words:** ore, mineral, kaolin, bentonite, rutile, pyrite, marble, manganese, tungsten, electrode.

**Сведения об авторах:**

**Шарафов Начибулло Хайбуллоевич** – Физико-технический институт им.С.У.Умарова НАН Таджикистана, соискатель. E-mail: sharafov.najibuiio@mail.ru.

**Асрори Муродиён** – доктор технических наук, ГУ НИИ «Металлургия» ОАО «ТАЛКО», зам.директора по науке.

**Сафаров Амиршо Гойбович** – доктор технических наук, Физико-технический институт им.С.У.Умарова НАН Таджикистана, ведущий научный.

**Ботуров Кодир** – кандидат физико-математических наук, Центр исследования и использования ВИЭ при ФТИ им.С.У.Умарова НАН Таджикистана, руководитель.

**Фарход Шокир** – кандидат физико-математических наук, Физико-технический институт им.С.У.Умарова НАН Таджикистана, директор.

**Одинаев Фатхулло Рахматович** – Физико-технический институт им.С.У.Умарова НАН Таджикистана, зав. лабораторией физики низких температур и сверхпроводимости.

УДК 550.4 (575.3)

Специальность: 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

М.М.МАМАДВАФОЕВ, Д.А.ДАВЛАТШОЕВ  
**О КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ПЕТРОГЕННЫМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ ГРАНИТОИДОВ И ЛАМПРОФИРОВ ИНТРУЗИВНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ КАФАНДАРИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ  
(ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ТАДЖИКИСТАН)**

*УП «Геологическая поисково-съёмочная экспедиция»  
Главного управления геологии при Правительстве Республики Таджикистан*

*Поступила в редакцию 29.08.2023 г.*

*Впервые рассматриваются парные, линейные корреляционные связи между петрогенными элементами разновозрастных ( $C_2$ ,  $C_3$ ,  $P_1$ ), разнорежимных (инверсионных, постинверсионно-орогенных), полиформационных («пёстрых» и порфирировых) и полифациальных (мезо- и гипабиссальных, субвулканических) гранитоидов и лампрофиров Центрального Таджикистана (Южный Тянь-Шань) в позиции Кафандаринского рудного поля. Установлено, что магматические породы характеризуются как более сильными корреляционными связями (зависимостями) между петрогенными элементами, так и большим количеством значимо коррелируемых элементов, тогда как изменённые их разности, в том числе метасоматические породы, отличаются ослабленными корреляционными связями между элементами, либо даже отсутствием этих связей, что может послужить критерием их разграничения. При этом  $Na$ ,  $K$ , а нередко и  $Al$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mg$ ,  $Ca$ ,  $Ti$ ,  $Mn$  в некоторых породах с другими элементами корреляционные связи вовсе не имеют, либо имеют их весьма мало, и ведут себя как вполне подвижные компоненты.*

**Ключевые слова:** петрогенные элементы, линейные парные корреляционные связи, сильные корреляционные связи (и зависимости), слабые корреляционные связи (и зависимости), отсутствие корреляционных связей (и зависимостей), гранитоиды, лампрофиры, метасоматически изменённые породы, Кафандаринское рудное поле.

---

*Адрес для корреспонденции: Мамадвафоев Мабатшо Мамадвафоевич. 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Мирзо Турсунзаде, 25, УП «Геологическая поисково-съёмочная экспедиция» Главного управления геологии при Правительстве РТ. E-mail: m.mamadvafoev@gmail.com*



В геохимии давно установлено [1], что коррелятивность – взаимное изменение, в содержании петрогенных элементов в магматических горных породах не является независимым фактором кристаллизующейся магматической системы, а обусловлено стехиометрическими отношениями петрогенных элементов в различных минералах, а также относительно постоянными отношениями между петрогенными минералами горных пород, – изоморфными железо-магнезиальными (оливин, пироксены, амфиболы, биотит) и щелочноалюмосиликатными (полевые шпаты, мусковит), а также кварца, образованных обычно при кристаллизационной дифференциации магматического расплава, согласно реакционной схемы Боуэна – Розенбуша, иногда путём эвтектики, перитектики и дистектики [2-4]. При этом в ходе кристаллизационной дифференциации магмы – главного процесса магматической кристаллизации – в одних случаях с увеличением содержания элемента X также возрастает содержание элемента Y, то есть между ними возникает прямая (положительная) стохастическая корреляция, в других случаях, наоборот, с ростом содержания элемента X содержание элемента Y уменьшается, то есть между ними устанавливается обратная (отрицательная) корреляция. Естественно, что нарушение соотношений содержаний петрогенных элементов в минералах и / или количественного соотношения между петрогенными минералами, происходящее при метасоматических изменениях исходной магматической породы, образованной по закономерностям магматической кристаллизации, неизбежно происходит ослабление или даже полное исчезновение корреляционной связи между петрогенными элементами [1]. Из изложенного следует, что в гранитоидах и лампрофирах, образованных по закономерностям магматической кристаллизации, между петрогенными элементами следует ожидать наличие сильных, статистически значимых, корреляционных связей, а ослабление последних, или их отсутствие, следует рассматривать как результат наложенных процессов, в том числе и метасоматических. Задачу выяснения связи (зависимости) между вещественными компонентами горной породы и особенностей этих связей (зависимостей), как известно, допустимо решать корреляционным методом анализа [1, 5 и др.]. Попытка решения этой задачи, на примере интрузивных комплексов Кафандаринского рудного поля, предпринята в настоящей работе. В ней впервые рассматриваются парные, линейные, корреляционные связи между петрогенными элементами разновозрастных ( $C_2$ ,  $C_3$ ,  $P_1$ ), разнорежимных (инверсионных, постинверсионно-орогенных), полиформационных («пёстрых» и порфирировых) и полифациальных (мезо- и гипабиссальных, субвулканических) гранитоидов и лампрофириров (табл.1, рисунок), геолого-петрологические и петрогеохимические особенности, и рудоносность которых особо рассматривались ранее [6-8], а здесь приводятся они в той мере, насколько это необходимо для правильного понимания излагаемого ниже вопроса. При этом, учитывая большой эмпирический материал геохимиков России [1, 9-11 и др.], при исследовании корреляционных связей между петрогенными элементами не принималась во внимание «ложная корреляция», на что настаивал А.Б.Вистелиус [12]. Так, А.А.Беус [1, стр. 44] отмечает, что: «Опыт деления на кислород при расчёте коэффициентов корреляции по отдельным группам гранитоидов показал, что получаемые в этом случае коэффициенты корреляции для большинства компонентов существенно не отличаются от вычисленных обычным способом. Во всяком случае ни один из незначимых коэффициентов не стал значимым, и наоборот». Аналогичная, фактически обоснованная, мысль содержится в других работах [9-11 и др.].

Корреляционный анализ [5] выполнен авторами с использованием программы Excel. Обработке подвергнуто 208 полных силикатных химических анализов 11 наиболее распространённых типов горных пород интрузивных комплексов Кафандаринского рудного поля, из которых 143 – опубликованные [7, 8], а остальные заимствованы из геологических отчётов Е.А.Космынина (1971 г.) и В.А.Колесниченко (1987 г.), хранящихся в фондах Главного управления геологии при Правительстве Республики Таджикистан.

Таблица 1

Парные, линейные, коэффициенты корреляции ( $r_{xy}$ ) между петрогенными элементами различных типов пород  
Кафандаринского рудного поля

| Типы пород, их возраст, число анализов (в скобке) | <i>Si –</i>  |                        |                        |                        |              |              |              |             |                        |                        |             |              |             |              |             |
|---|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|------------------------|------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|   | <i>Ti</i>    | <i>Al</i>              | <i>Fe<sup>3+</sup></i> | <i>Fe<sup>2+</sup></i> | <i>Mn</i>    | <i>Mg</i>    | <i>Ca</i>    | <i>Na</i>   | <i>K</i>               |                        |             |              |             |              |             |
| 1. Кварцевые диориты С <sub>2</sub> (26)          | <b>-0,63</b> | -0,17                  | 0,32                   | <b>-0,75</b>           | -0,11        | <b>-0,78</b> | <b>-0,84</b> | <b>0,55</b> | 0,34                   |                        |             |              |             |              |             |
| 2. Кварцевые латит-порфиры Р <sub>1</sub> (14)    | -0,05        | <b>-0,64</b>           | <b>-0,69</b>           | <b>-0,55</b>           | <b>-0,90</b> | <b>-0,89</b> | <b>-0,66</b> | <b>0,82</b> | 0,32                   |                        |             |              |             |              |             |
| 3. Керсантиты С <sub>3</sub> (17)                 | <b>-0,76</b> | 0,17                   | <b>-0,51</b>           | <b>-0,86</b>           | <b>-0,70</b> | <b>-0,62</b> | <b>-0,93</b> | 0,27        | 0,23                   |                        |             |              |             |              |             |
| 4. Гранит-порфиры Р <sub>1</sub> (9)              | <b>-0,81</b> | <b>-0,87</b>           | -0,35                  | -0,61                  | -0,46        | <b>-0,89</b> | <b>-0,90</b> | 0,40        | 0,38                   |                        |             |              |             |              |             |
| 5. Гранодиориты С <sub>2</sub> (26)               | <b>-0,68</b> | -0,33                  | -0,21                  | <b>-0,47</b>           | -0,32        | <b>-0,76</b> | <b>-0,71</b> | <b>0,41</b> | 0,27                   |                        |             |              |             |              |             |
| 6. Кварцевые порфиры Р <sub>1</sub> (16)          | -0,18        | -0,15                  | -0,41                  | -0,27                  | 0,15         | <b>-0,90</b> | <b>-0,78</b> | -0,01       | -0,31                  |                        |             |              |             |              |             |
| 7. Аплитовидные граниты С <sub>3</sub> (30)       | -0,22        | <b>-0,61</b>           | <b>-0,53</b>           | <b>-0,55</b>           | 0,00         | <b>-0,51</b> | <b>-0,56</b> | <b>0,36</b> | <b>-0,36</b>           |                        |             |              |             |              |             |
| 8.. Адамеллиты С <sub>3</sub> (19)                | -0,42        | -0,38                  | -0,20                  | <b>-0,48</b>           | 0,28         | <b>-0,47</b> | -0,19        | -0,02       | 0,20                   |                        |             |              |             |              |             |
| 9. Вогезиты С <sub>3</sub> (11)                   | 0,01         | -0,33                  | -0,32                  | -0,01                  | <b>-0,78</b> | 0,34         | 0,17         | 0,19        | -0,33                  |                        |             |              |             |              |             |
| 10. Спессартиты С <sub>3</sub> (26)               | -0,28        | 0,34                   | <b>-0,41</b>           | -0,23                  | -0,27        | <b>-0,69</b> | <b>-0,79</b> | <b>0,49</b> | 0,09                   |                        |             |              |             |              |             |
| 11. Диориты С <sub>2</sub> (14)                   | 0,36         | 0,20                   | 0,01                   | -0,25                  | 0,06         | <b>-0,67</b> | 0,18         | <b>0,60</b> | 0,23                   |                        |             |              |             |              |             |
| Типы пород  | <i>Ti –</i>  |                        |                        |                        |              |              |              | <i>Al –</i> |                        |                        |             |              |             |              |             |
|   | <i>Al</i>    | <i>Fe<sup>3+</sup></i> | <i>Fe<sup>2+</sup></i> | <i>Mn</i>              | <i>Mg</i>    | <i>Ca</i>    | <i>Na</i>    | <i>K</i>    | <i>Fe<sup>3+</sup></i> | <i>Fe<sup>2+</sup></i> | <i>Mn</i>   | <i>Mg</i>    | <i>Ca</i>   | <i>Na</i>    | <i>K</i>    |
| 1. Кварцевые диориты                              | -0,14        | <b>-0,53</b>           | <b>0,54</b>            | -0,06                  | <b>0,45</b>  | <b>0,66</b>  | <b>-0,48</b> | -0,19       | -0,10                  | 0,25                   | 0,02        | 0,18         | 0,08        | -0,26        | -0,09       |
| 2. Кварцевые латит-порфиры                        | -0,29        | 0,45                   | -0,09                  | 0,20                   | 0,16         | 0,49         | -0,22        | -0,12       | 0,22                   | <b>0,81</b>            | <b>0,64</b> | <b>0,73</b>  | 0,37        | <b>-0,66</b> | 0,04        |
| 3. Керсантиты                                     | -0,24        | <b>0,70</b>            | <b>0,66</b>            | 0,37                   | 0,45         | <b>0,81</b>  | -0,33        | -0,11       | -0,35                  | -0,10                  | 0,07        | -0,41        | -0,36       | 0,09         | <b>0,49</b> |
| 4. Гранит-порфиры                                 | 0,60         | 0,12                   | <b>0,69</b>            | 0,32                   | 0,60         | <b>0,73</b>  | -0,20        | -0,62       | 0,57                   | 0,26                   | <b>0,74</b> | <b>0,85</b>  | <b>0,73</b> | -0,48        | -0,51       |
| 5. Гранодиориты                                   | <b>0,51</b>  | 0,26                   | <b>0,45</b>            | <b>0,44</b>            | <b>0,49</b>  | 0,27         | <b>-0,39</b> | -0,08       | <b>0,48</b>            | 0,18                   | 0,12        | 0,02         | -0,08       | <b>-0,49</b> | 0,34        |
| 6. Кварцевые порфиры                              | 0,24         | 0,21                   | 0,16                   | <b>-0,51</b>           | -0,02        | -0,13        | -0,04        | 0,21        | 0,15                   | -0,03                  | -0,15       | -0,11        | -0,34       | 0,27         | 0,25        |
| 7. Аплитовидные граниты                           | 0,19         | 0,09                   | 0,25                   | -0,11                  | 0,34         | 0,10         | 0,08         | -0,17       | <b>0,39</b>            | 0,26                   | -0,03       | 0,01         | -0,11       | <b>-0,39</b> | <b>0,58</b> |
| 8. Адамеллиты                                     | 0,37         | 0,16                   | <b>0,46</b>            | -0,08                  | 0,38         | 0,08         | -0,21        | -0,04       | -0,08                  | 0,38                   | -0,37       | <b>0,51</b>  | 0,13        | -0,13        | <b>0,56</b> |
| 9. Вогезиты                                       | <b>0,90</b>  | 0,37                   | -0,59                  | 0,25                   | 0,46         | -0,05        | 0,54         | 0,02        | -0,23                  | <b>0,64</b>            | -0,02       | -0,55        | -0,20       | -0,42        | -0,03       |
| 10. Спессартиты                                   | <b>0,44</b>  | <b>0,53</b>            | 0,22                   | -0,14                  | 0,12         | 0,02         | -0,15        | 0,08        | <b>-0,44</b>           | -0,06                  | -0,08       | <b>-0,53</b> | -0,34       | 0,12         | -0,02       |
| 11. Диориты                                       | 0,28         | <b>0,80</b>            | -0,09                  | 0,46                   | -0,51        | 0,10         | 0,38         | -0,06       | -0,13                  | 0,25                   | 0,09        | <b>-0,56</b> | 0,46        | 0,32         | <b>0,22</b> |

Продолжение таблицы 1

| Типы пород                 | $Fe^{3+}$ –  |             |              |              |              |       | $Fe^{2+}$ – |             |             |              |              |
|----------------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
|                            | $Fe^{2+}$    | $Mn$        | $Mg$         | $Ca$         | $Na$         | $K$   | $Mn$        | $Mg$        | $Ca$        | $Na$         | $K$          |
| 1. Кварцевые диориты       | <b>-0,53</b> | <b>0,40</b> | <b>-0,46</b> | <b>-0,57</b> | <b>0,57</b>  | 0,33  | -0,15       | <b>0,88</b> | <b>0,81</b> | <b>-0,63</b> | <b>-0,51</b> |
| 2. Кварцевые латит-порфиры | 0,06         | <b>0,68</b> | <b>0,57</b>  | <b>0,80</b>  | <b>-0,68</b> | -0,24 | <b>0,67</b> | <b>0,79</b> | 0,39        | <b>-0,64</b> | 0,04         |
| 3. Керсантиты              | 0,19         | 0,13        | 0,23         | <b>0,59</b>  | -0,27        | -0,27 | <b>0,70</b> | <b>0,59</b> | <b>0,81</b> | -0,41        | -0,14        |
| 4. Гранит-порфиры          | -0,20        | 0,46        | 0,53         | 0,19         | -0,38        | -0,33 | 0,01        | 0,59        | <b>0,72</b> | -0,21        | 0,03         |
| 5. Гранодиориты            | -0,37        | -0,09       | 0,11         | -0,03        | -0,35        | 0,18  | <b>0,66</b> | 0,38        | 0,30        | -0,36        | 0,09         |
| 6. Кварцевые порфиры       | <b>0,74</b>  | 0,02        | 0,38         | 0,07         | -0,18        | 0,20  | 0,10        | 0,10        | 0,11        | -0,36        | 0,30         |
| 7. Аплитовидные граниты    | <b>0,36</b>  | -0,15       | 0,31         | 0,04         | -0,02        | 0,12  | -0,20       | <b>0,37</b> | <b>0,39</b> | -0,27        | -0,03        |
| 8. Адамеллиты              | <b>-0,50</b> | -0,36       | 0,03         | -0,12        | 0,15         | -0,31 | 0,21        | <b>0,51</b> | <b>0,54</b> | <b>-0,48</b> | 0,20         |
| 9. Вогезиты                | <b>-0,75</b> | 0,15        | -0,29        | -0,04        | 0,01         | 0,18  | -0,11       | 0,09        | -0,31       | -0,03        | -0,26        |
| 10. Спессартиты            | 0,05         | -0,09       | 0,35         | <b>0,46</b>  | -0,29        | 0,09  | <b>0,50</b> | 0,25        | 0,18        | -0,27        | 0,14         |
| 11. Диориты                | -0,01        | 0,49        | -0,16        | -0,12        | 0,10         | -0,29 | 0,29        | 0,14        | 0,01        | -0,10        | -0,12        |

Продолжение таблицы 1

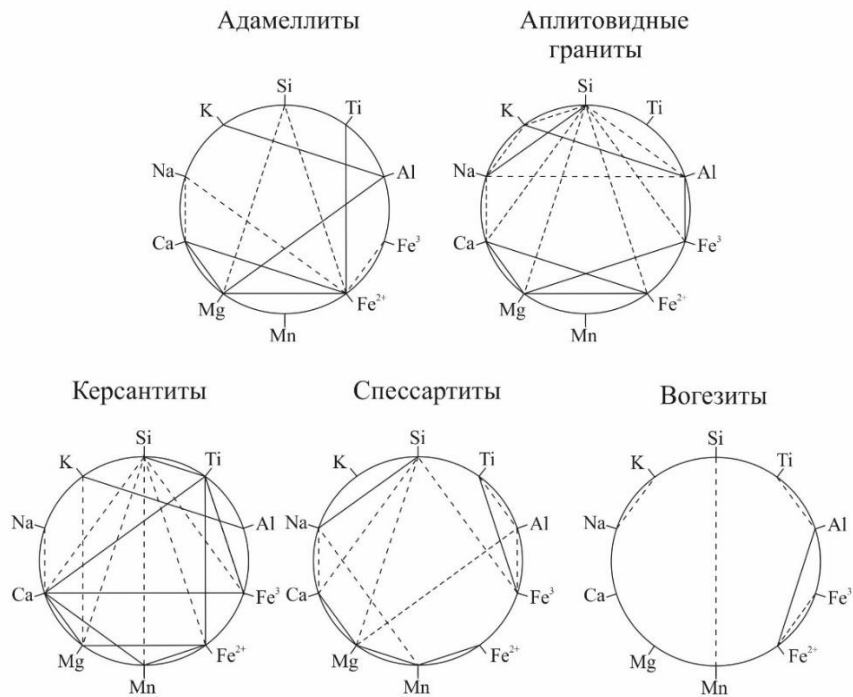
| Типы пород                 | $Mn$ –      |             |              |             | $Mg$ –       |              |              | $Ca$ –       |              | $Na$ –       |
|----------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                            | $Mg$        | $Ca$        | $Na$         | $K$         | $Ca$         | $Na$         | $K$          | $Na$         | $K$          | $K$          |
| 1. Кварцевые диориты       | 0,09        | -0,17       | 0,18         | <b>0,40</b> | <b>0,80</b>  | <b>-0,46</b> | <b>-0,48</b> | <b>-0,74</b> | <b>-0,54</b> | <b>0,41</b>  |
| 2. Кварцевые латит-порфиры | <b>0,94</b> | <b>0,71</b> | <b>-0,78</b> | -0,40       | <b>0,76</b>  | <b>-0,87</b> | -0,38        | <b>-0,83</b> | -0,33        | 0,20         |
| 3. Керсантиты              | 0,26        | <b>0,66</b> | -0,03        | 0,01        | <b>0,65</b>  | -0,44        | <b>-0,58</b> | -0,32        | -0,25        | -0,01        |
| 4. Гранит-порфиры          | 0,46        | 0,24        | -0,07        | -0,47       | <b>0,89</b>  | <b>-0,66</b> | -0,22        | -0,62        | -0,30        | 0,10         |
| 5. Гранодиориты            | <b>0,41</b> | 0,25        | <b>-0,51</b> | 0,16        | <b>0,73</b>  | <b>-0,49</b> | <b>-0,53</b> | <b>-0,40</b> | -0,35        | -0,11        |
| 6. Кварцевые порфиры       | -0,11       | -0,08       | 0,29         | -0,41       | <b>0,82</b>  | -0,04        | 0,15         | -0,31        | 0,20         | <b>-0,54</b> |
| 7. Аплитовидные граниты    | -0,08       | -0,04       | -0,09        | -0,06       | <b>0,44</b>  | 0,08         | -0,27        | <b>-0,36</b> | -0,08        | <b>-0,61</b> |
| 8. Адамеллиты              | -0,12       | -0,03       | -0,12        | -0,12       | <b>0,48</b>  | -0,42        | 0,25         | <b>-0,79</b> | 0,12         | -0,42        |
| 9. Вогезиты                | -0,07       | -0,13       | 0,11         | 0,09        | 0,20         | 0,27         | -0,26        | -0,55        | 0,31         | <b>-0,73</b> |
| 10. Спессартиты            | <b>0,43</b> | <b>0,39</b> | <b>-0,44</b> | 0,09        | <b>0,62</b>  | -0,21        | -0,21        | <b>-0,52</b> | -0,14        | -0,35        |
| 11. Диориты                | -0,04       | 0,12        | 0,03         | -0,22       | <b>-0,67</b> | <b>-0,88</b> | 0,21         | <b>0,58</b>  | -0,34        | -0,43        |

Примечание. Жирным шрифтом выделены и подчеркнуты значимые при данном числе степеней свободы и уровне значимости 0.05 (как наиболее широко употребляемый при проверке статистических гипотез [5]) коэффициенты корреляции ( $r_{xy}$ ); остальные коэффициенты – незначимые. Расчёты произведены Д.А.Давлатшоевым с использованием программы Excel.

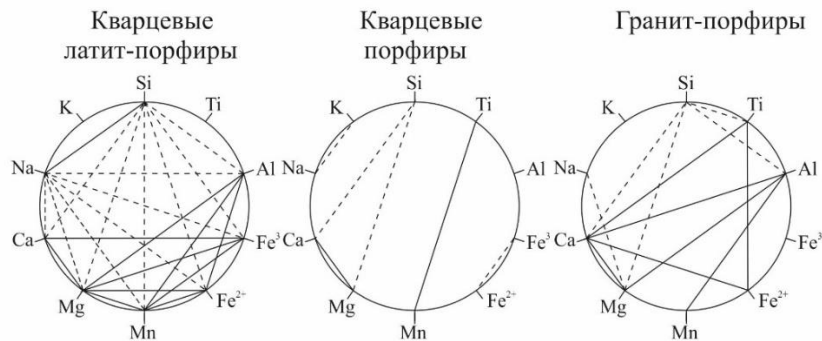
1. Инверсионный среднекарбонный комплекс



2. Инверсионный, позднекарбонный комплекс



3. Послеинверсионно-орогенный, раннепермский комплекс



———— значимые положительные связи  
 - - - - - значимые отрицательные связи

**Рисунок.** Круговые корреляционные диаграммы петрогенных элементов интрузивных комплексов Кафандаринского рудного поля.

Из результатов корреляционного анализа (табл.1, рис.) следует, что гранитоиды и лампрофиры Кафандаринского рудного поля, в первом приближении, допустимо разделить на две группы, очевидно различимые по силе и количеству значимо коррелируемых петрогенных элементов. К первой группе относятся инверсионные (C<sub>2,3</sub>) батолитовые кварцевые диориты C<sub>2</sub>, послеинверсионно-орогенные субвулканические кварцевые латит-порфиры (P<sub>1</sub>), керсантиты C<sub>3</sub>, гранит-порфиры P<sub>1</sub>, гранодиориты C<sub>2</sub> (№№ 1-5 в табл. 1) с отчётливо выраженными, преимущественно сильными ( $r_{xy} \geq 0.50$ ) корреляционными связями между петрогенными элементами. Ко второй группе относятся постинверсионно-орогенные субвулканические кварцевые порфиры P<sub>1</sub>, аплитовидные граниты, адамеллиты, вогезиты, спессартиты C<sub>3</sub>, диориты C<sub>2</sub> (№№ 6-11 в табл. 1), со значительно ослабленными ( $r_{xy} < 0.50$ ) силами корреляционных связей между петрогенными элементами, в силу наложенных процессов, в том числе метасоматических. Изложенное очевидно по данным величины среднего показателя силы корреляционной связи между петрогенными элементами (табл. 2), вычисленной для каждого типа породы, и выведенной из формулы [1]:  $R^2_{cp} = \Sigma r^2 / N$ , где  $r$  – значимые парные коэффициенты корреляции в матрице,  $N$  – количество парных коэффициентов корреляции в матрице (табл. 1).

Ниже в последовательности уменьшения средних показателей силы корреляционной связи между петрогенными элементами (табл.2), приводится краткая характеристика корреляционных связей в каждой из рассматриваемых типов горных пород (табл. 1, рис.).

**Кварцевые диориты.** Из 45 парных коэффициентов корреляции, получаемых комбинацией из 10 элементов – Si, Ti, Al, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn, Mg, Ca, Na, K – для кварцевых диоритов значимыми являются лишь 26, или всего 58 % (от 100), что обусловлено их гибридным, ассимиляционным, генезисом и последующими эпигенетическими (наложенными) минеральными новообразованиями в породе. Кремний – остаток кислотного окисла SiO<sub>2</sub>, наиболее распространённый в гранитоидах элемент, имеет

Таблица 2

Величина средних показателей силы корреляционной связи между петрогенными элементами в различных типах пород Кафандаринского рудного поля

| Группы пород | Типы пород и их возраст                   | $R^2_{cp}$ | %  | Примечание  |
|--------------|---|------------|----|---|
| 1            | 1. Кварцевые диориты C <sub>2</sub>       | 0.284      | 58 | парных корреляционных связей существенны<br>«<br>«<br>«<br>«<br>« |
|              | 2. Кварцевые латит-порфиры P <sub>1</sub> | 0.281      | 53 |   |
|              | 3. Керсантиты C <sub>3</sub>              | 0.182      | 38 |   |
|              | 4. Гранит-порфиры P <sub>1</sub>          | 0.158      | 27 |   |
|              | 5. Гранодиориты C <sub>2</sub>            | 0.119      | 42 |   |
| 2            | 6. Кварцевые порфиры P <sub>1</sub>       | 0.071      | 13 |   |
|              | 7. Аплитовидные граниты C <sub>3</sub>    | 0.070      | 36 |   |
|              | 8. Адамеллиты C <sub>3</sub>              | 0.070      | 24 |   |
|              | 9. Вогезиты C <sub>3</sub>                | 0.065      | 11 |   |
|              | 10. Спессартиты C <sub>3</sub>            | 0.058      | 33 |   |
|              | 11. Диориты C <sub>2</sub>                | 0.056      | 16 |   |

сильную ( $r_{xy} > 0.50$ ) отрицательную связь с Ti, Fe<sup>2+</sup>, Mg, Ca, что является следствием его количественных отношений с основаниями пироксена (диопсид-геденбергитового ряда), роговой обманки, апатита, магнетита, сфена (и др.). Наблюдаемая сильная положительная связь Si и Na в данных породах, необычная для нормальных гранитоидов [1], является, по-видимому, выражением зависимости между кремнекислотностью гранитоида и количеством альбитовой молекулы в плагиоклазе, как следствие кислотно-основного взаимодействия компонентов [9, 13, 14] в гибридной, гомогенной, кристаллизующейся магме. Об этом же свидетельствует сильная положительная связь Na с Ca, и отрицательная – с Mg. Положительная связь Si с Fe<sup>3+</sup>, K и отрицательная – с Mn, Al, весьма слабая, незначимая. Любопытно, что для Al – второго по распространённости в гранитоидах элемента, входящего в состав роговой обманки, плагиоклаза, калишпата, биотита, цоизита, эпидота, альбита, пренита – выявлено отсутствие корреляционных связей со всеми петрогенными элементами, что, по-видимому [1], может служить показателем его *вполне подвижного поведения* при формировании породы. Данное положение относится, вероятно, и к Mn, образующую связь лишь с K и Fe<sup>3+</sup>.

Поведение Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Ti, Mg – с одной стороны, и Na, K – с другой, в кварцевых диоритах, равно как в других гранитоидах, определяется важной ролью в них роговой обманки, магнетита, сфена (для Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Ti, Mg), плагиоклаза, калишпата, биотита (для Na, K), представляющих их основные минералы-концентраты. С этих позиций понятно наличие сильной положительной связи Fe<sup>2+</sup> с Ti, Ca, Mg, и сильной отрицательной – с Si, Na, K, как выражение кислотно-основной дифференциации компонентов в магматическом расплаве-растворе. Трёхвалентное Fe положительную связь имеет с Na, Mn, и отрицательную, помимо Fe<sup>2+</sup>, с Ti, Ca, Mg. Титан, наряду с Si, сильную отрицательную связь имеет с Fe<sup>3+</sup>, Na, и положительную – с Fe<sup>2+</sup>, Mg, Ca. Натрий образует положительную, слабую, связь с K, и сильную – с Si, Fe<sup>3+</sup>, обусловленную их вхождением, преимущественно, в роговую обманку; с Ti, Fe<sup>2+</sup>, Mg и Ca, натрий имеет отрицательную связь. Наконец K, наряду с Na, имеет слабую положительную связь с Mn, и отрицательную – с Fe<sup>2+</sup>, Mg, Ca, обусловленные их вхождением в роговую обманку и биотит.

**Кварцевые латит-порфиры.** Данные породы, известные также под названиями риодациты и деллениты, представляют химические аналоги гранодиорита. Они, наряду с гранит-порфирами и кварцевыми порфирами, представляют дайковые тела, – подводющие каналы раннепермских вулканитов трахибазальт-трахиандезит-дацит- липаритовой формации [15]. По количеству образуемых, между 10 элементами, парных значимых коэффициентов корреляции (53 %), они занимают промежуточное положение между гранодиоритами и кварцевыми диоритами, существенно тяготея к последним (табл. 2).

Кремний, кроме Ti, K, образует сильную отрицательную связь с основаниями – Al, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn, Mg, Ca, Na, как следствие отношения кремнекислотного остатка SiO<sub>2</sub> с основаниями пироксена, роговой обманки и плагиоклаза. Отрицательная связь Si с Ti незначима, как и положительная его связь с K, что обусловлено, по-видимому, *вполне*

*подвижным* поведением К и Ti при образовании данной породы. Алюминий сильную отрицательную связь, наряду с Si, образует с Na в плагиоклазе, и сильную положительную – с Mg, Mn, Fe<sup>2+</sup> в роговой обманке; с Ca его положительная связь незначима. Fe<sup>3+</sup> имеет сильную положительную связь с Mn, Mg, Ca в роговой обманке и сильную отрицательную – с Si, Na в плагиоклазе. Связь Fe<sup>3+</sup> с Fe<sup>2+</sup>, как и с *вполне подвижным* К, сильно ослаблена, незначима. Отсутствие корреляционной связи Si, Al с Ti, и Si, Na с К обусловлено, очевидно, *вполне подвижным* поведением Ti и К при кристаллизации магматического расплава-раствора. Fe<sup>2+</sup> в роговой обманке имеет сильную положительную связь с Al, Mn, Mg и сильную отрицательную – с Si, Na. Сильную положительную связь имеют Mg, Mn, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al – с одной стороны, и Mg, Fe<sup>3+</sup> – с другой. Эти две группы элементов через Ca образуют *множественную связь* (см. рис.) в роговой обманке. Na, положительно связанный с Si, как выражение отношения кремнекислоты и альбитовой молекулы плагиоклаза, с основаниями (кроме *вполне подвижных* Ti и К) имеет сильную отрицательную связь. Представляется, что характер связи между петрогенными элементами в кварцевых латит-порфирах, обусловлен постоянством количественных отношений кремнекислотного окисла – SiO<sub>2</sub>, с одной стороны, и оснований, входящих в пироксен, роговую обманку, плагиоклаз, калишпат, биотит, магнетит, сфен (и др.) – с другой, образованных по закономерностям кристаллизационной дифференциации гомогенной магмы.

**Керсантиты.** В этих лампрофирах диоритового ряда, завершающих инверсионный гранитоидный магматизм в Южном Тянь-Шане [8], Si имеет ряд возрастающей сильной отрицательной зависимости с основаниями – Fe<sup>3+</sup> ( $r_{xy} = -0.51$ ), Mg, Mn, Ti, Fe<sup>2+</sup>, Ca ( $r_{xy} = -0.93$ ), обусловленной постоянством количественных отношений Si – с одной стороны, и петрогенных оснований пироксена, роговой обманки, плагиоклаза, калишпата, биотита (и др.) – с другой. Связь Si с К, Na, входящих в роговую обманку, полевые шпаты и биотит, хотя и положительная, однако ослаблена и незначима. Связь Al, Na, К (кроме пары Al-К и К-Mg) с другими элементами сильно ослаблена и незначима, что, по-видимому, допустимо рассматривать как показатель *легко подвижного поведения* Na, Al, К в петрогенезисе камптонитов. Последние два элемента имеют положительную связь в калишпате, а К-Mg – сильную отрицательную связь в биотите, роговой обманке. Fe<sup>3+</sup> имеет сильную положительную связь с Ca, Ti, возможно в роговой обманке; Fe<sup>2+</sup> сильную положительную связь имеет с Mn, Mg, а последний – с Ca. Из изложенного следует, что в керсантитах на фоне ослабления связей между рядом элементов и *вполне подвижного поведения* Na, К и Al, исходные, «магматогенные», зависимости между некоторыми петрогенными элементами, всё же, сохранены. В этой связи небезынтересен установленный рядом исследователей факт метасоматического образования керсантитов по диоритовым порфиритам даек [8].

**Гранит-порфиры.** В данных породах, представляющих субвулканические дайки, подводящие каналы раннепермских вулканитов поверхностных фаций [15], в силу малого числа степеней свободы (количества анализов:  $n - 2$ ), в целом ряде случаев, даже довольно сильные показатели связи между петрогенными элементами оказались незначимыми.

Существенными оказались лишь 12, или 27 % зависимостей, являющиеся весьма сильными (обычно  $r_{xy} > 0.60$ ). Кремний в породе имеет сильную отрицательную связь с Ti, Al, Mg, Ca, как выражение постоянных количественных отношений кремнекислотного окисла  $\text{SiO}_2$  с основаниями, входящими в биотит (Ti, Al, Mg) и плагиоклаз (Al, Ca). Слабая отрицательная связь Si с  $\text{Fe}^{3+}$  при сильной отрицательной связи с  $\text{Fe}^{2+}$  (в биотите), как и слабая положительная связь с Na, K (в калишпате), оказались незначимыми. Алюминий имеет положительную зависимость с Mn, Mg в биотите, и Ca – в плагиоклазе. Связи  $\text{Fe}^{3+}$  и K с другими петрогенными элементами сильно ослабленные, незначимые ( $r_{xy} < 0.50$ ) и могут быть приняты как показатели *вполне подвижного их поведения* при образовании гранит-порфиров. Близкое поведение с *вполне подвижным* обнаруживают Mn и Na, имеющие по одной значимой связи в парах Mn + Al и Na – Mg. Двухвалентное Fe образует сильную положительную связь с Ti в биотите, а Ca – в плагиоклазе, образуя изотонический парагенезис Fe, Ti, Ca [16]. Магний в биотите имеет сильную положительную связь с Al и отрицательную – с Na.

**Гранодиориты.** В данных гибридных породах количество значимых связей между петрогенными элементами составляет всего 19 или 42 %. В связи с ослаблением и несущественностью большинства (58 %) исходных, «магматогенных» связей между петрогенными элементами, допустимо принять возможным влияние на их генезис наложенных явлений, в том числе – метасоматических. Связи Si с Al,  $\text{Fe}^{3+}$ , Mn, K сильно ослаблены наложенными процессами и незначимы. Слабую, хотя и значимую, отрицательную связь Si образует с  $\text{Fe}^{2+}$ , а сильную – с Ti, Mg, Ca, как результат постоянства количественного отношения кислотного окисла –  $\text{SiO}_2$ , с основаниями обыкновенной роговой обманки, биотита, андезина, ортоклаза (реже микроклина) в процессе кристаллизации гомогенной магмы. Положительную, значимую, связь Si образует лишь с Na в роговой обманке и плагиоклазе. Алюминий образует положительную значимую связь с  $\text{Fe}^{3+}$  и сильную с Ti, вероятнее всего, в роговой обманке. При этом, с Na образует значимую отрицательную связь в плагиоклазе и роговой обманке. Любопытно, что  $\text{Fe}^{3+}$  имеет единственную значимую связь с Al (показатель *вполне подвижного компонента?*), а  $\text{Fe}^{2+}$  – сильную положительную связь с Mn и значимую – с Si. Магний имеет сильную положительную связь с Ca и отрицательную – с Na (в авгите, роговой обманке), K (в биотите), Si – в авгите, роговой обманке. Кальций образует сильную отрицательную связь с Si и Na в плагиоклазе. Магний имеет сильную отрицательную связь с Si, K, Na и сильную положительную – с Ca, в роговой обманке и авгите. Натрий образует значимые отрицательные связи с Ti, Al, Mn, Mg, Ca в авгите, роговой обманке, и положительную связь – с Si (в плагиоклазе). Калий ведёт себя в породе как *вполне подвижной компонент*, если пренебречь единственной его отрицательной сильной связью с Mg. В равной степени как *вполне подвижной компонент* в породе ведёт себя  $\text{Fe}^{3+}$ .

**Кварцевые порфиры.** По величине средних показателей силы корреляционной связи между петрогенными элементами и количеством значимо связанных пар элементов, кварцевые порфиры относятся ко второй группе пород (табл. 2), характеризующихся



сильно ослабленными значениями этих показателей. Первичная, «магματοгенная», связь в них сохранена лишь в 6 парах (из 45 возможных): Si – Mg, Si– Ca, Ti – Mn, Fe<sup>3+</sup> – Fe<sup>2+</sup>, Na – K (отрицательная связь) и Mg+Ca (положительная связь). Эти сильные, как бы «остаточные», связи (и зависимости), очевидно, обусловлены закономерностями постоянства количественных отношений кислотного окисла SiO<sub>2</sub>, с одной стороны и оснований биотита (K, Mg, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Ti, Mn), магнетита (Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>), плагиоклаза (Ca, Na) и калишпата (K) – с другой, как результат кислотно-основного взаимодействия и дифференциации элементов в кристаллизующейся магме. Любопытно, что Al, возможно также Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup> Na, K, ведут себя в породе как *вполне подвижные компоненты*, их связи с другими элементами весьма слабые и незначимые (кроме пары Fe<sup>3+</sup> – Fe<sup>2+</sup>). Ослабление и исчезновение на 87 %, первичных «магματοгенных» связей между петрогенными элементами, очевидно, может служить показателем проявления в данной породе наложенных процессов, в том числе и метасоматических.

**Аплитовидные граниты.** По величине среднего показателя силы корреляционных связей между петрогенными элементами, данные граниты практически не отличаются от кварцевых порфиров, но почти в три раза превосходят их по количеству значимых пар связей между петрогенными элементами (табл. 2). Для аплитовидных гранитов из 45 возможных парных коэффициентов корреляции 16 (или 36 %), являются значимыми. Кремний имеет отрицательную сильную связь с Al, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg, Ca, значимую – с K, и положительную значимую связь с Na, что обусловлено закономерностями кислотно-основной дифференциации элементов при кристаллизационной дифференциации магмы [9,13,14]. Алюминий отрицательную связь имеет с Si, Na (в плагиоклазе), а с Fe<sup>3+</sup> и K, в противовес Si, образует положительную связь (в калишпате), что, с учётом сильной отрицательной связи в паре K – Na, указывает на метасоматическое замещение плагиоклаза калишпатом. Fe<sup>2+</sup> имеет значимую положительную связь с Mg и Ca в биотите и редко отмечаемой роговой обманке. Любопытно, что показатели силы связи Ti и Mn с петрогенными элементами весьма ослаблены, незначимы, что может служить показателем *вполне подвижного их поведения* в петрогенезисе.

**Адамеллиты.** Данные породы, иначе называемые роговообманково-биотитовые граниты, по величине среднего показателя силы корреляционных связей между петрогенными элементами (табл. 2), с кварцевыми порфирами и аплитовидными гранитами однородны, а по количеству значимо коррелируемых элементов занимают между ними срединное положение, что свидетельствует о существенном влиянии на их образование наложенных процессов, в том числе – метасоматических. Кремний имеет всего лишь две значимые ( $r_{xy} < 0.50$ ) отрицательные связи – с Fe<sup>2+</sup> и Mg, обусловленные кислотно-основной дифференциацией элементов при кристаллизации магматического расплава-раствора [9,13,14]. Алюминий также имеет две связи, положительные, сильные ( $r_{xy} > 0.50$ ) – с Mg и K в роговой обманке и биотите. Fe<sup>3+</sup> имеет лишь одну сильную отрицательную зависимость в равновесии Fe<sup>3+</sup> ↔ Fe<sup>2+</sup> и вкупе с Mn ведёт себя как *вполне подвижной компонент*. Магний имеет

сильные положительные связи с Al, Fe<sup>2+</sup>, Ca в роговой обманке, образуя множественную связь с Fe<sup>2+</sup> и Ca (см. рис.). Натрий имеет сильную отрицательную зависимость с Ca в плагиоклазе, и значимую отрицательную – с Fe<sup>2+</sup> в роговой обманке. Калий имеет лишь одну сильную положительную зависимость с Al в калишпате, с другими элементами связи не имеет, что, по-видимому, может свидетельствовать о вполне подвижном его поведении при образовании адамеллитов.

**Вогезиты.** По величине среднего показателя силы корреляционных связей между петрогенными элементами (табл. 2), вогезиты находятся между адамеллитами и спессартитами, а по количеству связей (значимых) между элементами близки к кварцевым порфирам. В образовании всех этих пород существенно влияние метасоматических процессов, приведших к ослаблению и / или полному уничтожению абсолютного большинства (89%) исходных «магматогенных» связей между петрогенными элементами. Сохранились лишь пять пар сильных ( $r_{xy} \geq 0.64 - 0.90$ ) связей. Так, Si и «примесный» Mn в вогезитах имеют единственную взаимозависимость, что, вероятно, может служить индикатором *вполне подвижного их поведения* в петрогенезисе. То же, Na и K, связанные единственной отрицательной зависимостью, с другими элементами значимую связь не имеют. При калиевом метасоматозе [17] в апоруде большинство исходных «магматогенных» связей исчезают на фоне образования «метасоматических» связей. Так, в вогезитах возникает близкая к функциональной, отрицательная связь Ti и Al (взамен обычной, положительной в гранитоидах [1, 18]), и сильная положительная связь между Al и Fe<sup>2+</sup> в авгите и роговой обманке. Явное *вполне подвижное поведение* устанавливается для Mg и Ca, вовсе не имеющие значимую связь с другими элементами. Здесь уместно допустить вероятность метасоматического образования вогезитов по диоритовым порфиридам даек при наложении на их магму щелочных трансмагматических флюидов, по аналогии с керсантитами Кафандаринского рудного поля [8].

**Спессартиты.** Эти породы по величине средних показателей силы корреляционной связи между петрогенными элементами в различных типах горных пород Кафандаринского рудного поля (табл. 2) находятся во второй их группе с резко ослабленными, в силу наложенных процессов, исходно магматическими связями между петрогенными элементами. По количеству же значимо коррелируемых петрогенных элементов, спессартиты в три раза превосходят вогезитов и в два раза – диоритов, замыкающих вторую группу пород. В спессартитах Si имеет лишь четыре пары связей (из 9 возможных): отрицательную – с Fe<sup>3+</sup> (значимую), Mg, Ca (сильную) в роговой обманке и положительную – с Na (значимую) в плагиоклазе. Алюминий имеет 3 пары связей: отрицательную, значимую – с Fe<sup>3+</sup>, Ti, и сильную – с Mg. Трёхвалентное Fe наряду с указанными отрицательными связями с Si и Al, имеет ещё сильную положительную связь с Ti. Двухвалентное Fe имеет единственную сильную положительную связь с Mn, который, в свою очередь, значимо положительно связан с Mg, а последний – сильной связью с Ca. Калий с петрогенными элементами значимую

корреляционную связь не имеет, что, по-видимому, может служить показателем его *вполне подвижного поведения* при образовании спессартитов.

**Диориты.** Эти гибридные, ассимиляционного генезиса, горные породы, по среднему показателю силы корреляционной связи между петрогенными элементами интрузивных комплексов (табл. 2), находятся на последнем месте. По количеству же значимых корреляционных связей между петрогенными элементами они превосходят лишь вогезиты и кварцевые порфиры, вкуче с которыми входят в группу пород с резко ослабленными первичными, «магматическими» связями между петрогенными элементами. Вместе с тем, в них проявлены «необычные», не «магматические», а «ассимиляционные» связи.

Итак, Si имеет лишь две, из 9 возможных, корреляционные связи – сильную отрицательную с Mg и «необычную» сильную положительную – с Na в авгите и роговой обманке. Al имеет лишь одну, сильную, связь с Mg – отрицательную, не «магматическую», в авгите и роговой обманке. Fe<sup>3+</sup> имеет обычную для гранитоидов [1] положительную связь с Ti в авгите, роговой обманке. Mg образует сильную, не «магматическую», отрицательную связь с Al, и особенно – с Na в авгите, роговой обманке. Сильная положительная связь в паре Ca+Na обусловлена, вероятнее всего, совместным их вхождением в плагиоклаз в процессе ассимиляции гранитной (аляскитовой ?) магмой вмещающих карбонатных пород. Особо следует отметить резкую ослабленность и незначимость связи Fe<sup>2+</sup>, Mn, K с другими петрогенными элементами, что может служить показателем *вполне подвижного их поведения* при кристаллизации гибридной диоритовой магмы. Это положение подтверждается также по данным работы [18, стр. 91] относительно Mn и K.

Используя значимые показатели силы корреляционной связи (табл. 1), интересно оценить средний показатель силы корреляционной связи ( $r^2_{cp}$ ) каждого петрогенного элемента породы с другими её элементами, по формуле [1]:  $r^2_{cp} = \Sigma r^2_{эл} / 9$  (табл. 3). По монотонно ослабевающей средней сумме средних показателей сил корреляционных связей ( $\Sigma r^2_{cp} / 11$ ), рассчитанной как простое среднее арифметическое из 11  $r^2_{cp}$  (табл. 3), все петрогенные элементы исследуемых пород допустимо разбить на три группы:

Таблица 3

Средние показатели силы корреляционной связи отдельных петрогенных элементов в различных типах пород интрузивных комплексов Кафандаринского рудного поля

| Элементы         | Первая группа пород              |  |                           |                               |                              |
|------------------|----------------------------------|--|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|
|                  | Кварцевые диориты С <sub>2</sub> | Кварцевые латит-порфиры Р <sub>1</sub> | Керсантиты С <sub>3</sub> | Гранит-порфиры Р <sub>1</sub> | Грано-диориты С <sub>2</sub> |
| Si               | 0.22                             | 0.48                                   | 0.37                      | 0.34                          | 0.21                         |
| Ti               | 0.16                             | 0                                      | 0.17                      | 0.11                          | 0.10                         |
| Al               | 0                                | 0.27                                   | 0.03                      | 0.28                          | 0.07                         |
| Fe <sup>3+</sup> | 0.25                             | 0.26                                   | 0.10                      | 0                             | 0                            |
| Fe <sup>2+</sup> | 0.33                             | 0.24                                   | 0.30                      | 0.11                          | 0.09                         |
| Mn               | 0.03                             | 0.46                                   | 0.16                      | 0.06                          | 0.10                         |
| Mg               | 0.23                             | 0.50                                   | 0.13                      | 0.16                          | 0.21                         |
| Ca               | 0.33                             | 0.31                                   | 0.37                      | 0.35                          | 0.06                         |
| Na               | 0.24                             | 0.36                                   | 0                         | 0                             | 0.09                         |
| K                | 0.09                             | 0                                      | 0.06                      | 0                             | 0.03                         |

| Элементы         | Вторая группа пород              |                                     |                           |                         |                            |                        | $\Sigma r_{cp}^2 / 11$ |
|------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
|                  | Кварцевые порфиры P <sub>1</sub> | Аплитовидные граниты C <sub>3</sub> | Адамеллиты C <sub>3</sub> | Вогезиты C <sub>3</sub> | Спессартиты C <sub>3</sub> | Диориты C <sub>2</sub> |                        |
| Si               | 0.16                             | 0.17                                | 0.11                      | 0.07                    | 0.17                       | 0.09                   | 0,22                   |
| Ti               | 0.03                             | 0                                   | 0.02                      | 0.09                    | 0.05                       | 0.07                   | 0.07                   |
| Al               | 0                                | 0.07                                | 0.06                      | 0.04                    | 0.07                       | 0.03                   | 0.08                   |
| Fe <sup>3+</sup> | 0.06                             | 0.05                                | 0.06                      | 0.06                    | 0.05                       | 0.07                   | 0.08                   |
| Fe <sup>2+</sup> | 0.06                             | 0.06                                | 0.16                      | 0.04                    | 0.03                       | 0                      | 0.13                   |
| Mn               | 0.09                             | 0                                   | 0                         | 0.07                    | 0.09                       | 0                      | 0.10                   |
| Mg               | 0.16                             | 0.06                                | 0.11                      | 0                       | 0.13                       | 0.22                   | 0.16                   |
| Ca               | 0.14                             | 0.09                                | 0.10                      | 0                       | 0.14                       | 0.09                   | 0.18                   |
| Na               | 0.03                             | 0.07                                | 0.09                      | 0                       | 0.03                       | 0.16                   | 0.09                   |
| K                | 0                                | 0.08                                | 0.03                      | 0                       | 0                          | 0                      | 0.03                   |

1.  $\geq 0.20$  – Si.
2.  $< 0.20 - 0.10$  – Ca, Mg, Fe<sup>2+</sup>, Mn.
3.  $< 0.10 - 0.03$  – Na, Fe<sup>3+</sup>, Al, Ti, K.

Здесь интересно нахождение в первой группе Si<sup>4+</sup> ведущего петрогенного элемента гранитоидов, регулирующего кремнекислотность магмы при кислотно-основном взаимодействии в ней, и её кристаллизации [13]. Любопытно и нахождение Na<sup>1+</sup> и K<sup>1+</sup> в третьей группе слабых оснований, нередко проявляющих в породах *вполне подвижное поведение*. Небезынтересно и то, что средние показатели силы корреляционной связи более высоки у элементов с чётными валентностями, по сравнению с элементами с нечётными валентностями. Здесь проблематична лишь валентность Ti (Ti<sup>3+?</sup>), оказавшегося в третьей группе элементов.

Данные табл. 3 убедительно свидетельствуют также о достаточно резком снижении силы корреляционной связи у всех элементов при переходе от первой группы пород (кварцевые диориты, кварцевые латит-порфиры, керсантиты, гранит-порфиры, гранодиориты) ко второй их группе (кварцевые порфиры, аплитовидные граниты, адамеллиты, вогезиты, спессартиты, диориты). Так, средние силы корреляционной связи отдельных петрогенных элементов в первой группе пород в подавляющем большинстве случаев выражаются десятичными долями (0.16, 0.22 и т.д.), а во второй их группе – обычно сотыми долями (0.03, 0.09 и т.д.). При этом минимальной силой корреляционной связи из петрогенных элементов характеризуется K, который в 6 типах пород (из общего 11) корреляционную связь с другими элементами не образует и ведёт себя, особенно в породах второй группы, как *вполне подвижный компонент*. В известной мере к калию приближается Na, причём в керсантитах, вогезитах и гранит-порфирах проявляет себя как *вполне подвижной компонент*. Вполне подвижное поведение в отдельных типах пород проявляют также Al – в кварцевых диоритах и кварцевых порфирах, Ti – в кварцевых латит-порфирах и аплитовидных гранитах, Fe<sup>3+</sup> в гранит-порфирах и гранодиоритах, Fe<sup>2+</sup> – в диоритах, Mn – в аплитовидных гранитах, адамеллитах и диоритах, Mg, Ca – в вогезитах. *Вполне подвижное поведение петрогенных*

элементов в вышеуказанных породах, равно как и ослабление в них корреляционных связей между петрогенными элементами, впервые выявленные методом корреляционного анализа, несомненно имеют наложенное, метасоматическое, происхождение.

Изложенные в статье материалы позволяют прийти к следующим общим выводам:

1. Корреляционные связи между петрогенными элементами исследованных гранитоидов и лампрофиров, выявленные через их массовые (весовые) содержания в породах, обусловлены стехиометрическими их отношениями в различных петрогенных и акцессорных минералах, и относительно постоянными отношениями между минералами горных пород, что в конечном счёте регулируется универсальными генетическими (магматическими или метасоматическими) закономерностями кристаллизации пород.

2. Постоянно наблюдаемое, в различной степени, ослабление (вплоть до полного исчезновения) силы корреляционных связей между петрогенными элементами в исследуемых породах, обусловлено проявлением в них различной степени наложенных, метасоматических, явлений и может служить индикатором отличия магматических и метасоматических образований.

3. Сильные щёлочи – Na и K, с другими петрогенными элементами имеют обычно ослабленные корреляционные связи, вплоть до их исчезновения, проявляя тем самым в породах *вполне подвижное поведение*. Аналогичное поведение в некоторых породах проявляют Al, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg, Ca, Ti, Mn. Единственное исключение составляет Si, проявляющий в породах обычно максимальную среднюю силу с петрогенными элементами.

4. Вероятностно-статистический корреляционный анализ связей (и зависимостей) между петрогенными элементами представляет дополнительный и эффективный метод при исследовании генезиса горных пород, на что ранее особо обратили внимание А.Б.Вистелиус [19] и А.А.Беус [1].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беус А.А., Ойзерман М.Т. О корреляционной связи между петрогенными элементами в гранитоидах. – М.: ВЗПИ. Сборник трудов. Выпуск 74. Серия: Геология, геохимия и геофизика, 1972, с. 43-51.
2. Левинсон-Лессинг Ф.Ю. Петрография. – Л.-М.-Новосибирск: НКТП, 1933, 460 с.
3. Заварицкий А.Н. Введение в петрохимию изверженных горных пород. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950, 400 с.
4. Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы. – М.: Изд-во АН СССР, 1955, 479 с.
5. Беус А.А., Григорян С.В., Ойзерман М.Т. и др. Руководство по предварительной математической обработке геохимической информации при поисковых работах. – М.: Недра, 1965, 120 с.
6. Мамадвафоев М.М. Петролого-геохимические особенности интрузивных комплексов Зеравшано-Гиссарской металлогенической зоны и связанное с ними оруденение (Центральный Таджикистан). – Душанбе: Ирфон, 2017, 237 с.
7. Мамадвафоев М.М., Бахтдавлатов Р.Д., Давлатшоев Д.А. К характеристике интрузивных образований Кафандарского рудного поля и их рудоносности (Восточный Гиссар). – Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Республики Таджикистан. Вып. 2, Душанбе: Дониш, 2019, с.53-68.

8. Мамадвафоев М.М., Давлатшоев Д.А. Петрохимия, геохимия и рудоносность интрузивных комплексов Кафандаринского рудного поля (Центральный Таджикистан). – Душанбе: Ирфон, 2022, 197 с.
9. Груза В.В. Кислотно-основная дифференциация в расплавах. – ДАН СССР, 1967, том 173, № 5, с. 1177-1180.
10. Давыденко И.В. К вопросу о корреляции между процентными величинами. – Вопросы петрохимии. – Л.: Изд. Ленингр. картфабрика ВАГТ, 1968, с.276-277.
11. Шестаков Ю.Г., Романова В.П., Володина Е.Н. К вопросу корреляции процентных величин химического анализа. – Советская геология, 1969, № 2, с.138-141.
12. Сарманов О.В., Вистелиус А.Б. О корреляции между процентными величинами. – Докл. АН СССР, 1959, том 126, № 1, с. 22 -26.
13. Коржинский Д.С. Кислотно-основное взаимодействие компонентов в расплавах. – Исследование природного и технического минералообразования. – М.: Наука, 1966, с. 5-26.
14. Коржинский Д.С. Кислотно-основное взаимодействие магмы с трансмагматическими флюидами. Геохимия. Минералогия. Петрология. – М.: Наука, 1976, с.320-328.
15. Мамадвафоев М.М. Геохимические особенности и рудоносность пермских магматических комплексов Южного Гиссара (Центральный Таджикистан). – Душанбе: Ирфон, 2016, 208 с.
16. Уклонский А.С. Изотонический парагенезис химических элементов. – Проблемы минералогии и геохимии. Избранные труды. – Ташкент: Фан, 1982, с.63-65.
17. Коржинский Д.С. Кислотность-щёлочность как главнейший фактор магматических и послемагматических процессов. Магматизм и связь с ним полезных ископаемых. – М.: Госгеолтехиздат, 1960, с. 21-30.
18. Хасанов А.Х. Петрология и рудоносность метасоматических комплексов Центрального Таджикистана. – Душанбе: Дониш, 1976, 250с.
19. Вистелиус А.Б. Мера связи между членами парагенезиса и методы её изучения. – Записки Всесоюз. минерал. об-ва, 1948, ч.77, № 2, с.147-158.

М.М.МАМАДВАФОЕВ, Д.А.ДАВЛАТШОЕВ

## **ОИДИ АЛОҚАИ КОРРЕЛЯТСИОНӢ БАӢНИ УНСУРҲОИ ПЕТРОГЕНИИ ГРАНИТОИДҲО ВА ЛАМПРОФИРҲОИ КОМПЛЕКСҲОИ ИНТРУЗИВИИ МАЙДОНИ МАЪДАННОКИ КАФАНДАРА (ТОҶИКИСТОНИ МАРКАЗӢ)**

***КВ «Экспедиция чустучӢю аксбардории геологи»-и  
Саридораи геологии назди Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон***

Бори аввал алоқаҳои чуфтӣ хаттии коррелятсионӣ байни унсурҳои петрогении гранитоидҳо ва лампрофирҳои синну-соли гуногундошта (С<sub>2</sub>, С<sub>3</sub>, Р<sub>1</sub>), гуногунреча (инверсионӣ, оргении постинверсионӣ), полиформатсионӣ (гуногунтаркиб, порфирӣ) ва полифатсиалӣ (мезо- ва гипабиссалӣ, субвулкони)-и Тоҷикистони Марказӣ (Тён-Шони Ҷанубӣ) дар мавқеи майдони маданноки Кафандара аз назар гузаронда шудаанд. Муайян карда шудааст, ки чинсҳои магматикӣ чӣ бо алоқаҳои нисбатан зӯри коррелятсионӣ байни унсурҳои петрогений, чӣ бо миқдори зиёдтари унсурҳои зич алоқамандбуда хосанд, дар мавриде, ки намудҳои тағйирёфтаи онҳо, аз он ҷумла – чинсҳои метасоматикӣ, бо алоқаҳои коррелятсионии сустшудаи байни унсурҳо, ё хатто бо набудани ин алоқаҳо фарқ мекунанд, ки метавонад

чун воситаи фарқият байни онҳо хизмат кунад. Дар ин ҳол, Na, K, баъзан Al, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg, Ca, Ti, Mn дар як ҳел чинсҳо бо дигар унсурҳои петрогенӣ алоқаҳои коррелятсионӣ надоранд, ё хеле кам доранд, ва худро чун унсурҳои пурра серҳаракат нишон медиҳанд.

**Калимаҳои калидӣ:** унсурҳои петрогенӣ, алоқаҳо (вобастагиро)-и ҳаттию чуфтии коррелятсионӣ, алоқаҳои зӯри коррелятсионӣ, алоқаҳои сусти коррелятсионӣ, набудани алоқаҳои коррелятсионӣ, гранитоидҳо, лампрофирҳо, чинсҳои тағйирёфтаи метасоматикӣ, майдони маъданноки Кафандара.

M.M.MAMADVAFOEV, D.A.DAVLATSHOEV

**ON CORRELATION BETWEEN PETROGENIC ELEMENTS  
OF GRANITOIDS AND LAMPROFIRES OF THE INTRUSIVE COMPLEXES  
OF KAFANDARA ORE FIELD (CENTRAL TAJIKISTAN)**

*UE “Geological Survey Expedition”,*

*Main Directorate of Geology under the Government of the Republic of Tajikistan*

This is the first-time review of paired, linear correlations between petrogenic elements of different ages (C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, P<sub>1</sub>), different regimes (inversion, postinversion-orogenic), polyformational (“variegated” and porphyritic) and polyfacial (meso- and hypabyssal, subvolcanic) granitoids and lamprophyres of the Central Tajikistan (Southern Tien-Shan) in the position of the Kafandara ore field. It has been established that magmatic rocks are characterized by both stronger correlations (dependencies) between petrogenic elements and a larger number of significantly correlated elements, while their altered varieties, including metasomatic rocks, are characterized by weaker correlations between elements, or even the absence of these relationships, which can serve as a criterion for their distinction. At the same time, Na, K, and sometimes Al, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg, Ca, Ti, Mn in some rocks with other elements have no or little correlation, and behave as completely mobile components.

**Key words:** petrogenic elements, linear pair correlations, strong correlations (and dependencies), weak correlations (and dependencies), absence of correlations (and dependencies), granitoids, lamprophyres, metasomatically altered rocks, Kafandara ore field.

**Сведения об авторах:**

**Мамадвафоев Мабатшо Мамадвафоевич** – УП «Геологическая поисково-съёмочная экспедиция» Главного управления геологии при Правительстве Республики Таджикистан

**Давлатшоев Давлатшо** – УП «Геологическая поисково-съёмочная экспедиция» Главного управления геологии при Правительстве Республики Таджикистан

УДК 551.4.012

Специальность: 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение, грунтоведение

Б.А.АЛАМОВ, Ш.А.ФАЙЗУЛЛОЕВ, Д.Ф.БАЙГЕНОВ, М.Р.РАХИМБЕКОВА,  
У.А.ШАРИФОВ

**СТЕПЕНЬ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СКЛОНОВ ДОЛИНЫ РЕКИ ОБИХИН-  
ГОУ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ОПОЛЗНЕЙ**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии  
НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 08.11.2023 г.*

*В статье проведены основные результаты исследования, направленные на выявление закономерностей оползневых явлений долины реки Обихингоу. Установлено, что оползневые явления исследуемой территории напрямую зависят от крутизны и экспозиции склонов, высотной зональности, количества атмосферных осадков и сейсмических воздействий.*

**Ключевые слова:** крутизна, экспозиция, атмосферные осадки, сейсмичность, экзогенные геологические процессы, восприимчивость.

Данные дистанционного зондирования Земли из космоса и данные, полученные с использованием беспилотных летательных аппаратов, нашли своё применение во многих отраслях науки. Больше всего они помогают при решении задач по землепользованию, инженерной геологии, геоэкологии, географии, геоморфологии, экологии, ботаники и гидрологии.

Экзогенные геологические процессы приносят урон народному хозяйству и, в некоторых случаях, к большим людским потерям. В горных странах среди них доминируют оползни. Для минимизации ущерба от этих процессов требуется всесторонний анализ закономерностей развития в зависимости от всех возможных условий. Решение этих задач традиционными методами (бурение скважин, шурфовка, анализ образцов, непосредственное наземное картирование) приводит к большим затратам. Все это подтверждает

---

*Адрес для корреспонденции:* Аламов Бехруз Ахмадшоевич, 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана. E-mail: behruz.beh@mail.ru



актуальность использования данных дистанционного зондирования. За последние годы с применением этих данных изучены пространственные закономерности оползневых явлений нескольких долин рек [1-5]. Среди них верхняя и средняя части реки Вахш изучены более детально в связи с тем, что там расположен каскад ГЭС, который имеет большое экономическое значение [6]. Долина реки Обихингоу не менее перспективна, она тоже имеет благоприятные условия для возведения гидротехнических сооружений.

Пиксель, казалось бы, что этот параметр рисунка важен только при характеристике качества фотоаппарата или видеокамеры, однако от размера пикселей космических и аэрофотоснимков зависит качество их дальнейшей обработки. Так, например, при дешифровке оползневых явлений или выделении тех или иных объектов пространственное разрешение данных дистанционного зондирования является ключевым.

За последние годы космические снимки программы Google Earth Pro заявили о себе как о главном источнике данных по анализу экзогенных геологических процессов. С применением результатов их дешифровки были изучены пространственные закономерности оползневых явлений. Среди входных данных для анализа проведённых работ наиболее важной является карта инвентаризации оползневых явлений [7,8].

**Методика исследования.** Для статистических аналитических процедур данной работы был избран метод соотношения частотности. После тщательного анализа отечественных и зарубежных источников оказалось, что этот метод больше всего подходит для данной территории. Расчет соотношения частотности [9,10] проводился по формуле;

$$FR_i = \frac{N_{cell}(S_i) / N_{cell}(N_i)}{\sum N_{cell}(S_i) / \sum N_{cell}(N_i)},$$

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.

В качестве анализируемых факторов выбраны пять часто дискутируемых в литературе: крутизна и экспозиция склонов, высотная зональность, количество атмосферных осадков (мм/год) и сейсмическое воздействие в виде пиковых ускорений грунта ( $m/c^2$ ).

О роли крутизны склонов в развитии оползней опубликовано достаточно много работ, где роль этого фактора оценивается как доминирующая морфометрическая. Эта точка зрения подтверждается не только экспериментальными работами, но и некоторыми доступными выявленными статистическими связями оползневых явлений с показателями этого фактора. Наиболее обоснованные данные, где по статистическим расчётам приведены аргументы о влиянии этого фактора, приводятся в работах [1,2,11,12].

Крутизна склона — это не просто фактор, от которого зависит развитие оползней, а условие, характеризующее массу рыхлых горных пород и степень влияния солнечных лучей.

В инженерной геологии для полного понимания привязанности оползневых явлений к конкретным показателям крутизны склонов невозможно исходить из ранее приведённых работ, хотя существующие результаты позволяют нам сделать предварительные выводы. Результаты наших исследований, которые отражены в таблице, показывают, что самыми уязвимыми показателями крутизны склона в этом морфометрическом факторе являются  $30-40^\circ$  и  $40-50^\circ$ , хотя в районе работ наблюдаются и более крутые склоны (рис. 1).

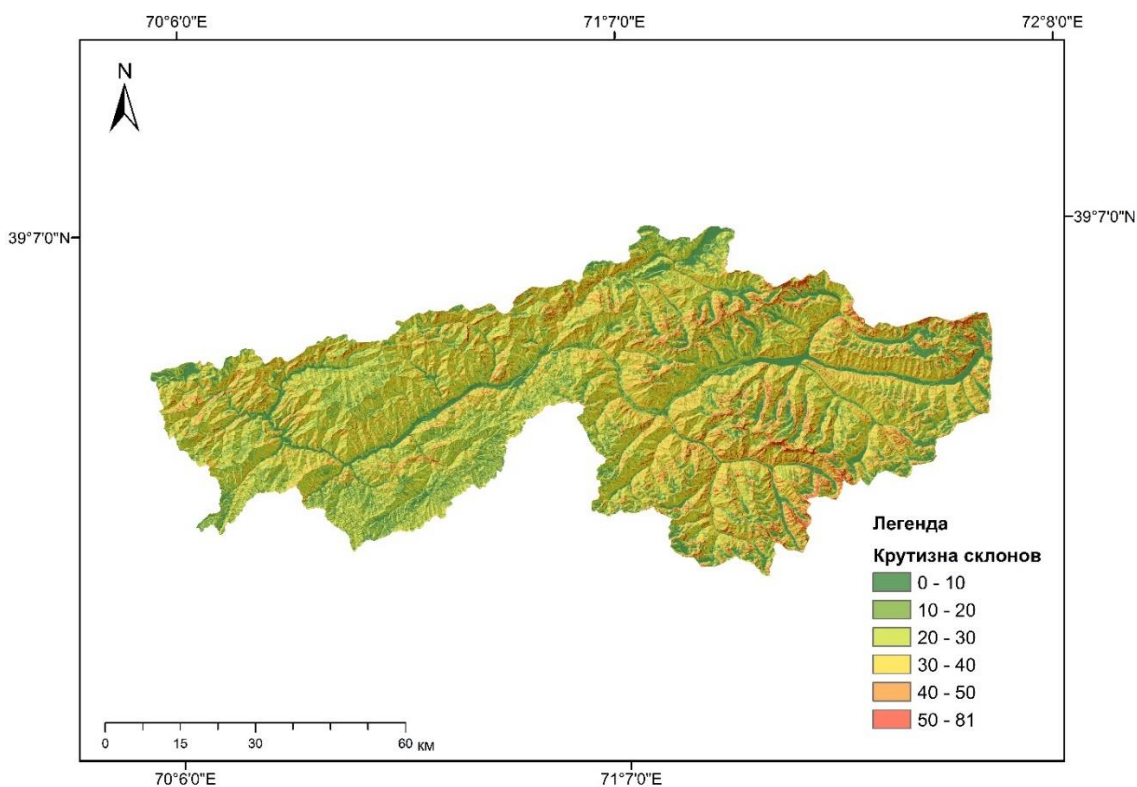


Рис. 1. Карта крутизны склонов долины реки Обихингоу.

Согласно существующим исследованиям по изучению климатических условий территорий Таджикистана рельеф является пока что единственным фактором, который существенно влияет на различные природные системы. Изменчивость природных систем больше всего подчиняет себе высотная зональность. При создании карт регионального назначения, где исследуемая территория подвергается зонированию и на основе каких-то критериев указываются отличия одной зоны от другой, высотная зональность играет большую роль. В нашем случае это вызывается тем, что оползни обычно развиты в разных климатических условиях, и разнообразие природы обуславливает абсолютные высоты территорий. Выделение зон с наибольшей распространённостью оползневых явлений возможно методом статистической обработки существующих данных. Надо признать, что

высотная зональность в поле важности, так и в поле точности показала себя ведущим фактором, вобрав наибольшее количество оползней в зоне высокой связи. Карта высотной зональности территории долины реки Обихингоу с целью анализа связи оползневых явлений была подразделена на 6 зон (рис. 2).

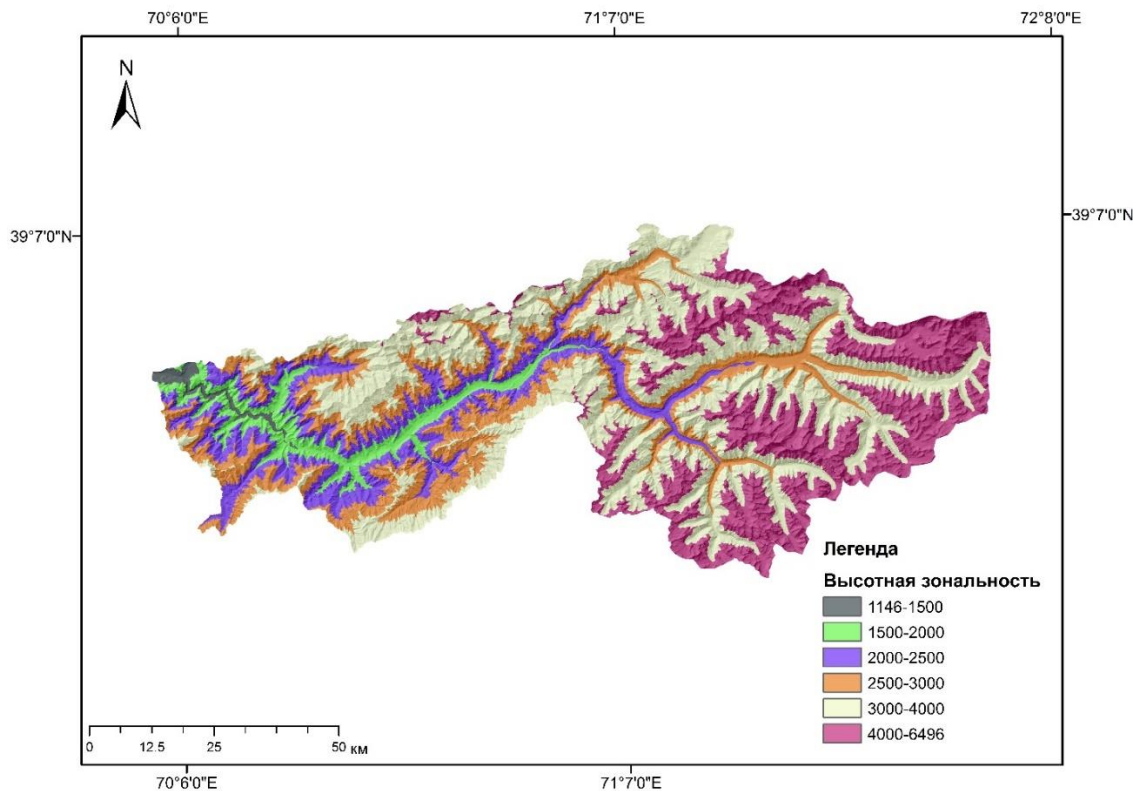


Рис. 2. Карта высотной зональности долины реки Обихингоу.

В этой работе мы не будем фокусироваться на деталях влияния этого фактора (рис. 2). Мы разберём лишь распространение оползневых явлений по классам этого фактора в связи с тем, что его роли посвящён ряд работ [1-5]. По результатам нашего анализа обнаружены три наиболее уязвимых класса высотной зональности: 1146-1500, 1500-2000 и 2000-2500 (табл. 1).

Известно, что территория Таджикистана относится к одному из наиболее сейсмически активных районов Средней Азии. На её территории каждые 5-10 лет происходят одно или два сильных землетрясения, интенсивностью 6 и более баллов. Эти сейсмические события, особенно в горных районах, часто сопровождаются остаточными деформациями грунтов в виде оползней, обвалов и трещин в грунте, которые иногда наносят больше ущерба, чем само сотрясение от землетрясения [1,2,11,12]. В пределах долины реки Обихингоу за период с 1934 г. по 2012 г. произошло более 5 сильных землетрясений интенсивностью в эпицентре от 6-7 до 8-9 баллов [11,12].

Следует отметить, что на возникновение вышеотмеченных экзогенно-геологических явлений, возможно, непосредственное влияние оказали сильные землетрясения,

произошедшие в данном районе. Примером этого может служить 7-балльное землетрясение с  $M=5.9$ , произошедшее 12 мая 2012 в долине реки Обихингоу, которое вызвало многочисленные остаточные деформации грунтов. Эпицентр землетрясения по макросейсмическим данным был расположен в 14 км к западу от пос. Тавильдара, на левом борту долины реки Обихингоу, вблизи кишлака Хамдара.

В качестве характеристики сейсмических воздействий для территории долины реки Обихингоу приведены пиковые ускорения грунтов в значениях  $g$  ( $m/c^2$ ) (рис. 3). По анализу этой карты выявлено, что второй класс является наиболее уязвимым (табл.).

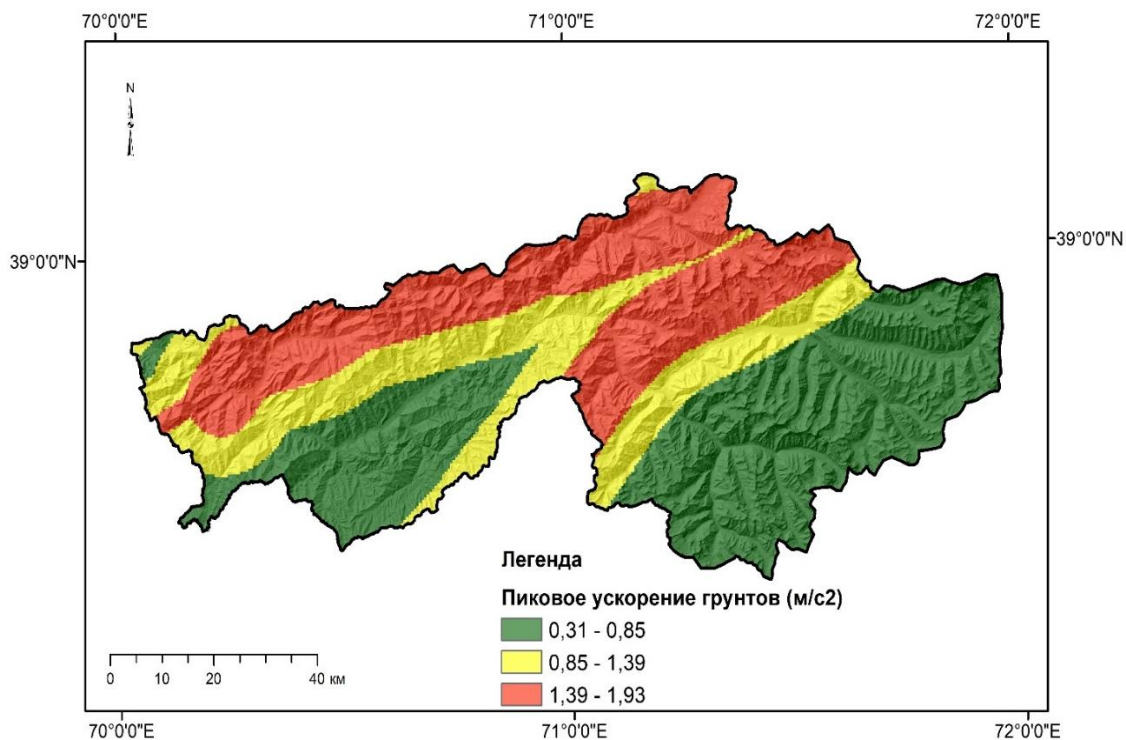


Рис. 3. Карта пиковых ускорений грунтов в значениях  $g$  ( $m/c^2$ ).

Все горные породы в той или иной степени теряют свою устойчивость при воздействии на них воды. У некоторых из них потеря устойчивости происходит более интенсивно. К быстрому разрушению под воздействием воды подвержены лёссовые породы, которыми богат район работ.

Известно, что источником воды горных территорий являются атмосферные осадки. Именно часть этих вод, поглощаясь землей, разрушает связи частиц грунтов. Без сомнения можно сказать, что фильтрационные воды разрушают горные породы постепенно и доводят их до неустойчивой консистенции.

Таблица

Результаты расчёта соотношения частотности по факторам оползнеобразований

| <b>Крутизна склонов (в градусах)</b>                            |                  |                   |                  |                   |            |
|---|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------|
| <b>Класс</b>  | <b>Ncell(Ni)</b> | <b>∑Ncell(Ni)</b> | <b>Ncell(Si)</b> | <b>∑Ncell(Si)</b> | <b>FRi</b> |
| 0-10  | 897248           |                   | 892              |                   | 0.53       |
| 10-20   | 1792271          |                   | 2285             |                   | 0.68       |
| 20-30   | 2379589          | 8133108           | 4924             | 15204             | 1.11       |
| 30-40   | 1988326          |                   | 4760             |                   | 1.28       |
| 40-50   | 850061           |                   | 2033             |                   | 1.28       |
| >50   | 225613           |                   | 310              |                   | 0.74       |
| <b>Экспозиция склонов</b>                                       |                  |                   |                  |                   |            |
| Ровная  | 27676            |                   | 0                |                   | 0.00       |
| Северная  | 1065918          |                   | 1799             |                   | 0.97       |
| Северо-восточная  | 961184           |                   | 1498             |                   | 0.89       |
| Восточная   | 944140           | 8133108           | 1129             | 1420              | 0.68       |
| Юго-восточная   | 987318           |                   | 2151             |                   | 1.25       |
| Южная   | 1028257          |                   | 683              |                   | 0.38       |
| Юго-западная  | 963816           |                   | 1171             |                   | 0.70       |
| Западная  | 1059148          |                   | 2782             |                   | 1.50       |
| Северо-западная   | 1095651          |                   | 2989             |                   | 1.56       |
| <b>Высотная зональность (м)</b>                                 |                  |                   |                  |                   |            |
| 1146-1500   | 70193            |                   | 871              |                   | 6.64       |
| 1500-2000   | 452922           |                   | 6692             |                   | 7.90       |
| 2000-2500   | 1009925          |                   | 5994             |                   | 3.17       |
| 2500-3000   | 1456715          | 8152246           | 1307             | 15206             | 0.48       |
| 3000-4000   | 3109015          |                   | 342              |                   | 0.06       |
| 4000-6496   | 2053476          |                   | 0                |                   | 0.00       |
| <b>Пиковые ускорения грунта в значениях g (м/с<sup>2</sup>)</b> |                  |                   |                  |                   |            |
| 0.31 – 0.85   | 3710046          |                   | 6216             |                   | 0.90       |
| 0.85 – 1.39   | 1851694          |                   | 6997             |                   | 2.03       |
| 1.39 – 1.93   | 2592405          | 8154145           | 1983             | 15196             | 0.41       |
| <b>Атмосферные осадки (мм/год)</b>                              |                  |                   |                  |                   |            |
| 474-550   | 5292068          |                   | 11133            |                   | 1.13       |
| 550-570   | 2235181          |                   | 4145             |                   | 1.00       |
| 570-590   | 311319           | 8214269           | 0                | 1527              | 0.00       |
| 590-614   | 375701           |                   | 0                |                   | 0.00       |

Распределение количества атмосферных осадков (мм/год) по долине реки Обихингоу приведено на (рис. 4). По результатам исследования оползневые явления подразделены на первый, второй и третий классы (табл.).

Среди факторов оползнеобразования изучение влияния экспозиции склонов (рис. 5) на развитие оползней играет немаловажную роль. В публикациях о роли атмосферных осадков в дестабилизации склонов приведено довольно много научно обоснованных данных, однако мало где говорится об их взаимодействии с экспозицией склонов. Их взаимодействие заключается в том, что на склонах с малым попаданием на них солнечных лучей влага в горных породах удерживается дольше, и, таким образом, создаются более благоприятные условия для возникновения оползней [7,13]. По результатам наших исследований в нескольких показателях экспозиции склонов выявлена близкая друг к другу

взаимосвязь оползневых явлений с экспозицией склонов (табл.). Такие связи наблюдаются в следующих классах: Юго-восточная 1.25, западная 1.50 и северо-западная 1.56.

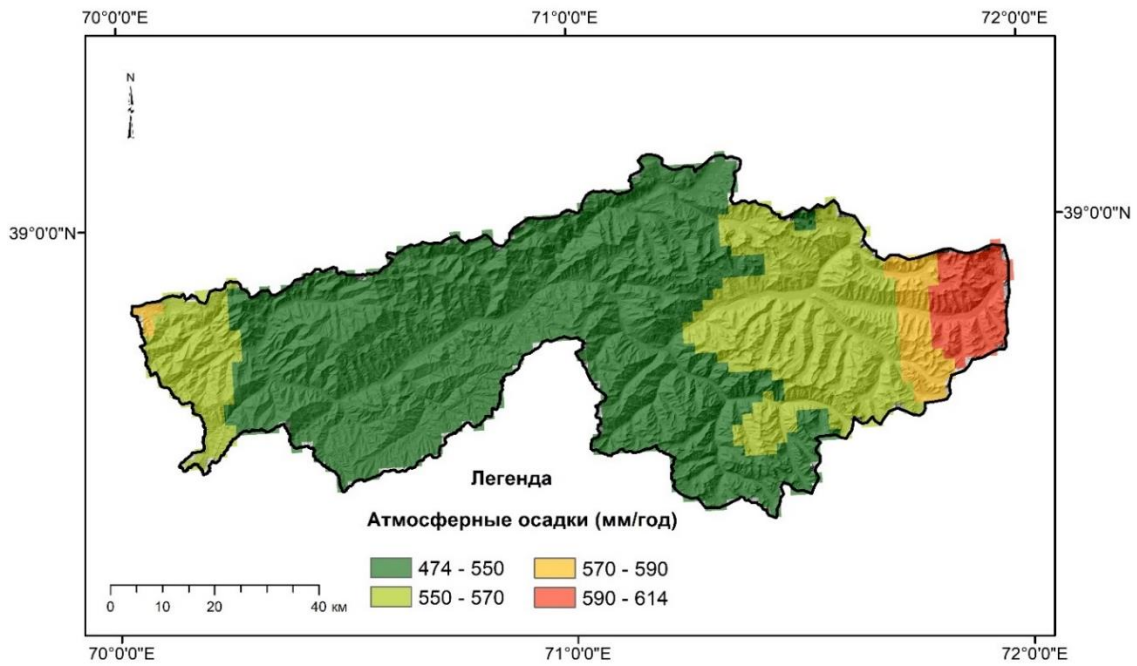


Рис. 4. Карта распределения количества атмосферных осадков долины реки Обихингоу.

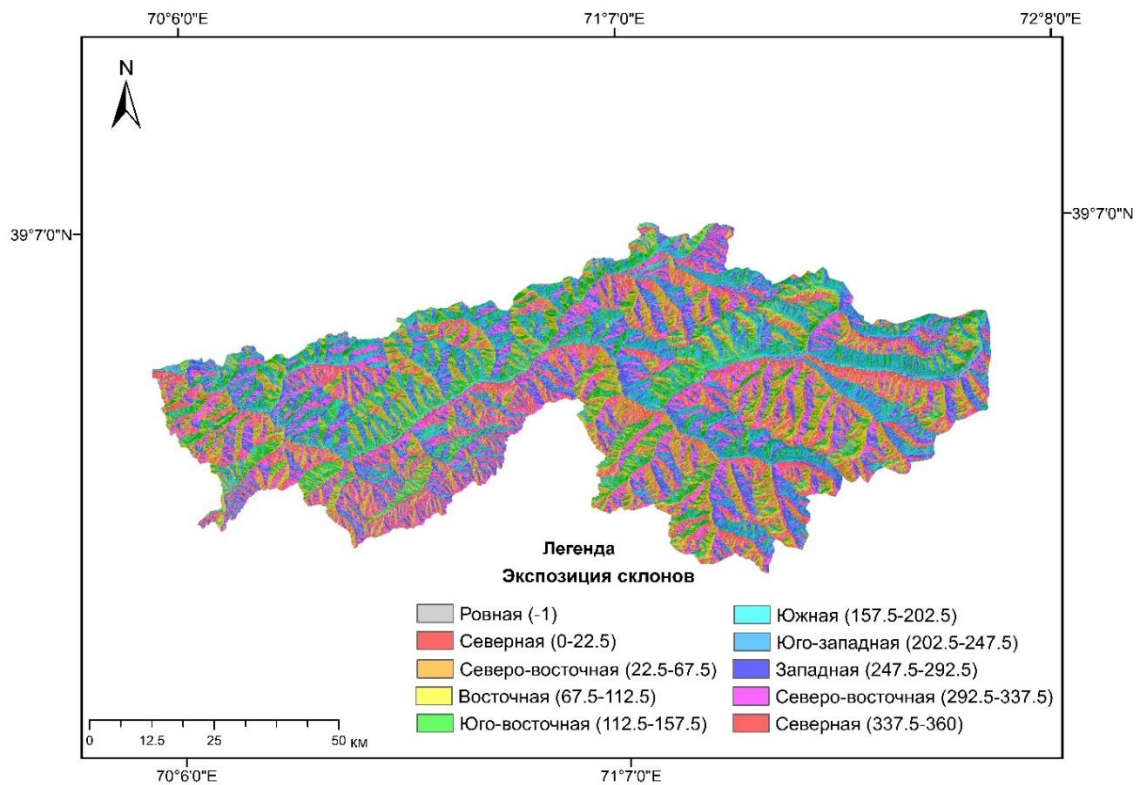
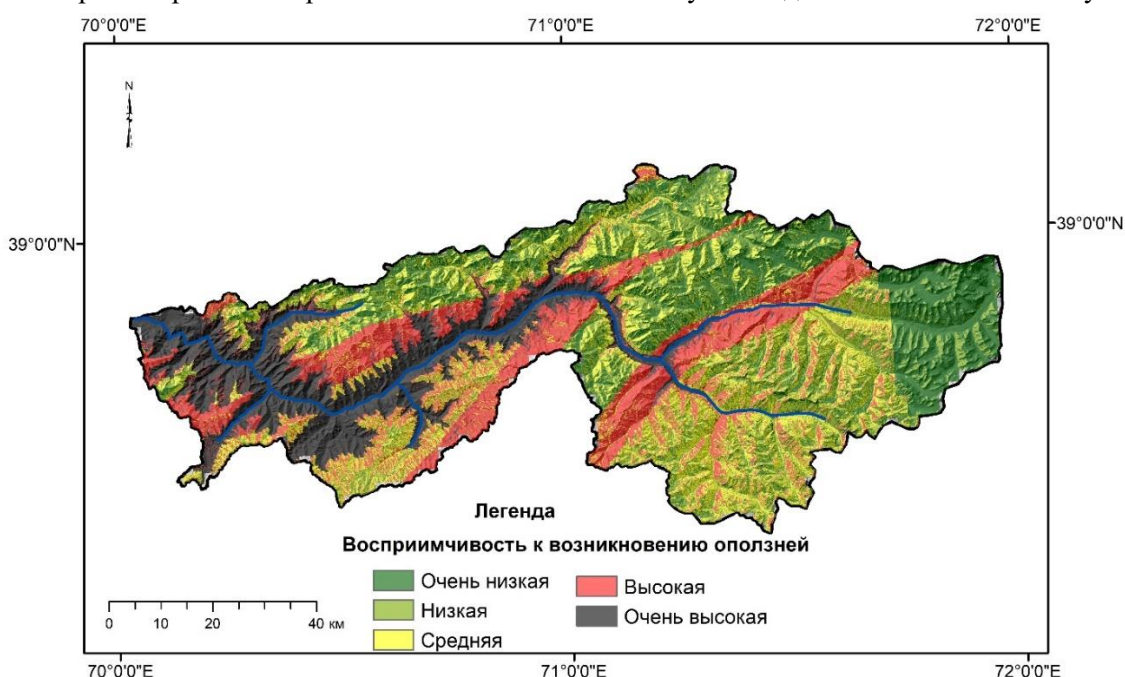


Рис. 5. Карта экспозиции склонов долины реки Обихингоу.

**Описание результатов.** Достаточно высокое статистическое взаимоотношение отмечено во всех анализируемых факторах.

Судя по карте восприимчивости к возникновению оползней (рис. 6), западная часть территории обладает очень высоким значением восприимчивости, за исключением некоторых частей, где из-за гипсометрического положения образование рыхлых масс горных пород практически невозможно. С началом работ в центральной части района зона с очень высокой восприимчивостью теряет свою большую роль и становится важной ролью высокой восприимчивости, хотя местами, в основном в недалёкой отдалённости от главной реки, наблюдаются и места с очень высокой восприимчивостью. К северу от центральной части максимальная восприимчивость склонов к возникновению оползней средняя. В северной части района работ восприимчивость окончательно затухает и достигает своего минимума.



**Рис. 6.** Карта восприимчивости к возникновению оползней долины реки Обихингоу.

## Выводы

По результатам нашего анализа обнаружено, что оползневые явления долины реки Обихингоу больше всего формируются при крутизне склонов от 30 до 50° под воздействием вод атмосферных осадков, поскольку лёссовые породы, которыми богат район работ, редко теряют свою устойчивую консистенцию без воздействия воды. Как следует из статистического анализа карты пиковых ускорений грунтов, связь данного анализируемого параметра с оползневыми явлениями данной территории не оправдывает наши ожидания в связи с тем, что в зоне с максимальным ускорением грунтов статистическая связь ниже. По анализу карты экспозиции склонов оползни больше всего встречаются на склонах с северо-западным направлением. Самым большим коэффициентом соотношения частотности

обладает второй класс высотной зональности 1500-2000. Первый класс карты высотной зональности (1146-1500) имеет коэффициент соотношения частотности 6.64 и лишь немного отстаёт от первого. Это доказывает, что на данной территории роль климата очень высока, высотная зональность выступает, в основном, как косвенный фактор оползнеобразования.

Создание модели восприимчивости к возникновению оползней не может быть предопределено одними лишь морфометрическими и климатическими условиями без учёта сейсмических воздействий. Целесообразно моделирование предрасположенных зон к возникновению оползней с учётом основного фактора, который служит спусковым крючком для их возникновения. Например, по пространственным закономерностям оползневых явлений относительно фактора крутизны склонов практически вся территория долины реки Обихингоу одинаково восприимчива к возникновению оползней, и совсем иная картина наблюдается, если интегрировано несколько основных факторов оползнеобразования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Mukhammadzoda Sh., Shohnavaz F., Ilhomjon O. and Zhang G. (2021) Application of Frequency Ratio Method for Landslide Susceptibility Mapping in the Surkhob Valley, Tajikistan. – Journal of Geoscience and Environment Protection, №9, pp. 168-189. doi: 10.4236/gep.2021.912011
2. Файзуллоев Ш.А., Байгенов Д.Ф., Аламов Б.А., Олимов. Б.К., Ёкубов Ш.А. Прогноз возникновения неглубоких оползней района каскада ГЭС на реке Вахш. – Наука и инновация, Таджикский национальный университет. Серия геологических и технических наук, 2020, №2. с. 38-43.
3. Байгенов Д.Ф., Файзуллоев Ш.А., Рахимбекова М.Р. Влияние крутизны и экспозиции склонов на распространения оползневых явлений долины реки Зеравшан. – Мат-лы междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии, гидрологии и разработки месторождений полезных ископаемых Таджикистана и сопредельных территорий», посвящённой 80-летию со дня рождения заслуженного работника Таджикистана, доктора технических наук, профессора, академика инженерной академии Республики Таджикистан Комилова Одины Комиловича, 25-го февраля 2022 г., с. 214-219.
4. Файзуллоев Ш.А. Моделирование восприимчивости к возникновению оползней методом соотношения частотности в Лахшском районе. – Труды Института геологии сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, 2021, вып. 4. с. 226-233.
5. Рахимбекова М.Р., Файзуллоев Ш.А. Зонирование территории долины реки Гунт по степени восприимчивости к возникновению оползней. – Известия НАНТ. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. н., 2023, №2(191), с. 64-75.
6. Шварц А.В. Влияние сейсмичности на проявления оползневых процессов в среднем течении реки Вахш. – Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ. Вып. 1. – Душанбе, 2018. с. 99-109.
7. Qiu H., Regmi A.D., Cui P., Hu S., Wang Y., He Y. (2017). Slope aspect effects of loess slides and its spatial differentiation in different geomorphologic types. – Arabian Journal of Geosciences, №10(15). doi:10.1007/s12517-017-3135-5.
8. Файзуллоев Ш.А. Корреляционный анализ некоторых факторов оползнеобразования среднего и верхнего течения р. Вахш. – Труды института геологии сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, 2021, вып. 4, с. 234-243.
9. Li L., Lan H., Guo C., Zhang Y., Li Q., Wu Y. A modified frequency ratio method for landslide susceptibility assessment. – Landslides, 2017, 14, pp. 727-741.



10. Zhang Y., Lan H., Li L., Wu Y., Chen J., Tian, N. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China. – J. Mt. Sci. 2020, №17, pp. 340-357.
11. Преснухин В.И. Влияние основных природных факторов на развитие оползней в Таджикистане. – Сб.: Гидрогеология и инженерная геология. – Душанбе, 1975, с. 209-223.
12. Преснухин В.И. Влияние крутизны склонов на развитие оползней в Таджикистане. – Сб.: Гидрогеология и инженерная геология. – Душанбе, 1975, с. 224-228.
13. Леонова А.В., Строкова Л.А., Никитенков А.Н. (2021). Оценка оползневых процессов на территории г. Томска с использованием ГИС-технологий. – Вестник ВГУ. Серия: Геология, 2021, №1, с. 94-103. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3341>

Б.А.АЛАМОВ, Ш.А.ФАЙЗУЛЛОЕВ, Д.Ф.БАЙГЕНОВ, М.Р.РАХИМБЕКОВА,  
У.А.ШАРИФОВ

## ДАРАҶАИ ТАЪСИРПАЗИРИИ ПАСТҲАМИҶОИ ВОДИИ ДАРӢИ ОБИХИНҶОУ АЗ ЯРЧӢО

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти геология, сохтмони ба заминҷунбӣ тобовар ва сейсмологияи  
АМИ Тоҷикистон*

Дар мақола нитиҷаҳои асосии тадқиқоти ба омӯзиши қонуниятҳои зухуротҳои ярҷии водии дарӢи Обихинҷоу равана карда шуда оварда шудааст. Тадқиқот нишон медиҳад, ки зухуротҳои ярҷии минтақаи омӯзишӣ бевосита аз кунҷ ва самти хобиши нишебӣ, баландии мутлақ, миқдори боришотҳои атмосферӣ ва таъсири сейсмикӣ вобастагӣ доранд.

**Калимаҳои калидӣ:** омилҳои зухуротҳои ярҷӣ, равандҳои экзогенӣ геологӣ, таъсирпазирӣ.

B.A.ALAMOV, Sh.A.FAIZULLOEV, D.F.BAIGENOV, M.R.RAKHIMBEKOVA,  
U.A.SHARIFOV

## THE DEGREE OF SUSCEPTIBILITY OF THE SLOPES OF THE OBIKHINGOU RIVER VALLEY TO THE OCCURRENCE OF LANDSLIDES

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
Institute of Geology, Earthquake and Seismology*

The article presents the main results of the study aimed at identifying the patterns of landslide phenomena of the Obikhingou River valley. It is established that the landslide phenomena of the studied territory directly depend on the steepness and exposures of the slopes, high-altitude zonality, the amount of precipitation and seismic impact.

**Key words:** factors, landslide phenomena, exogenous geological processes, susceptibility.

### **Сведения об авторах:**

**Аламов Бехруз Ахмадшоевич** – Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, младший научный сотрудник, соискатель. E-mail: behruz.beh@mail.ru.

**Файзулов Шохнаваз Абдукодирович** – Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, старший научный сотрудник. E-mail: shohnavaz.faizullov@mail.ru.

**Байгенов Дамир Фарухович** – соискатель Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, научный сотрудник. E-mail: baigenov87@mail.ru.

**Рахимбекова Манижа Рахмонбековна** – соискатель Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, младший научный сотрудник. E-mail: rahimbekova@mail.ru.

**Шарифов Умеджон Амиргулхонович** – Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, научный сотрудник. E-mail: sharifovu@mail.ru.

УДК 620.92

Специальность: 2.4.3 – Электроэнергетика

М.ИЛОЛОВ, Ш.О.КАБИРОВ\*, С.РАСУЛОВ, Дж.Ш.РАХМАТОВ, Н.Ш.ЮСУФБЕКОВ  
**О ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСАХ СОЛНЕЧНОЙ  
ЭНЕРГИИ И ПРОИЗВОДСТВА ЗЕЛЕННОГО ВОДОРОДА В РАЙОНЕ ОЗЕРА  
КАРАКУЛЬ (ВОСТОЧНЫЙ ПАМИР)**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана,  
\*Министерство промышленности и новых технологий Республики Таджикистан*

*Поступила в редакцию 22.11.2023 г.*

*Данное исследование преследует цель оценить возможности организации промышленного производства водорода в Таджикистане с учетом достигнутых достижений научно-технического прогресса в данной области высокотехнологических странах, таких как США, Великобритания, Япония, Канада, Германия, Россия, Китай и Южная Корея и других. В качестве объекта исследования рассматривается территория на берегу озера Каракуль как наиболее благоприятный район Восточного Памира по насыщенности потоков солнечной радиации, наличию достаточных объемов водных ресурсов, а также близкому географическому расположению с рынками потребления энергоносителей.*

**Ключевые слова:** озеро Каракуль, солнечная радиация, солнечная электрическая станция (СЭС).

**Введение.** Основной задачей энергетической политики при современном состоянии экономики и энергетики Таджикистана является переориентация отношений к своим энергетическим ресурсам, а главным образом к их экономическим, социальным, экологическим и техническим аспектам. Требуется выработать такую стратегию развития топливно-энергетического комплекса страны (ТЭК), которая при любых масштабах экономического роста гарантировала бы надежное и эффективное функционирование микро- и макроэкономики. К сожалению, в настоящее время ТЭК, в основе которого лежит гидроэнергетика, не обеспечивает стабильность энергоснабжения экономики страны, а также ее

---

*Адрес для корреспонденции:* Илолов Мамадшо. 734025, Таджикистан, Душанбе, прос. Рудаки 33, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана. E-mail: [ilolov.mamadsho@gmail.com](mailto:ilolov.mamadsho@gmail.com)

энергетическую безопасность. Масштабы ежегодного дефицита электроэнергии в зимний период исчисляются миллиардами кВт.ч., несмотря на то, что Таджикистан располагает колоссальными возобновляемыми гидроэнергетическими ресурсами: около 527 млрд. кВт.ч потенциальные, 300 млрд. кВт.ч технические, 150 млрд. кВт.ч из них экономически целесообразные. Однако, имея такие богатые энергетические ресурсы, национальная энергетическая система не может выйти из сложившейся ситуации, и такое негативное явление в энергетическом секторе приобретает хронический характер, который в дальнейшем приведет в обязательном порядке к нежелательному энергетическому кризису и изменению в структуре топливно-энергетического баланса страны. Например, за отмеченный период доля тепловых электрических станций (ТЭС) в структуре генерирующих мощностей энергосистемы выросла на 12% и составила 710 мВт. Основная причина – отсутствие достаточного финансирования в строительстве гидравлических электростанций, так как для реализации гидроэнергетических объектов потребуются большие капиталовложения и длительные сроки строительства [1]. Кроме того, за последние 25-30 лет затраты на строительство одного кВт мощности ГЭС также выросли от 500 до 2600 долларов США, а по источникам Международного Энергетического Агентства эти удельные показатели вырастут к 2030 году до 5500 долларов США. Поэтому, если такими темпами будет развиваться теплоэнергетика, энергосистема Таджикистана вынуждена будет перейти в другое состояние функционирования. При этом возникает новая большая проблема для Таджикистана, от которой страны, использующие углеводородное топливо, страдают в значительной степени, и которые вынуждены вкладывать колоссальные инвестиции для снижения ее экологических последствий. Эта всем известная проблема охраны окружающей среды и снижение выброса углекислого газа в атмосферу. Таджикистан не имеет право позволить себе развивать теплоэнергетику на основе использования ископаемого топлива в большом масштабе. Дело в том, что в этом регионе формируются более 40% водных ресурсов Центральной Азии, и Таджикистан оберегает самый крупный в мире ледник (ледник Федченко) на суше.

Такое положение дел приводит к необходимости поиска новых источников энергии и получения на их основе нового энергоносителя. Поэтому Таджикистану необходимо переориентировать свой ТЭК на использование другого возобновляемого источника энергии, которой богата ее территория. Таким практически неисчерпаемым возобновляемым ресурсом является потенциал солнечной энергии, особенно ими достаточно богат Восточный Памир благодаря своему высокому расположению над уровнем моря. Следует отметить, что это никоим образом не поставляется в противовес перспективному развитию гидроэнергетики в республике, а наоборот параллельно солнечной энергетике добивается повышение надежности и эффективности энергетического производства электрических станций в электроэнергетической системе страны.

**Объект исследования.** Озеро Каракуль – крупное бессточное озеро на Восточном Памире, расположенное к югу от Заалайского хребта. Озеро лежит в плоской котловине на высоте 3914 метров над уровнем моря, оно на 100 метров выше известного высокогорного

озера Титикака в Перу. Это самое крупное в мире ледниково-тектоническое озеро с площадью 380 кв.км без островов и максимальной глубиной 240 метров, прозрачность воды доходит до 9 м. Каракуль окружен пустынными скалистыми хребтами на западе, подходящими к озеру, а на востоке, отстоящими от него на несколько десятков километров (см. рис. 1). В Каракуль впадают небольшие реки Караджилга, Караарт, Акджилга, Музкол и несколько более мелких, но при этом не вытекает ни одной, что превращает озеро в бессточное. На восточном берегу озера недалеко от автотрассы на 137 км от райцентра Мургаб расположено село Каракуль с населением чуть больше 600 человек. Любопытно, что берега озера в холодное время года на значительном протяжении покоятся на льду, лед залегает круглогодично на дне озера. У ученых нет единого мнения относительно этого льда. Одни считают, что это остатки древних ледников, другие объясняют это явление остатками ледяного щита, заполнявшего котловину в ледниковый период, третьи предполагают, что лед образовался недавно.

С ноября по апрель горный водоем покрыт льдом, толщина которого в середине зимы доходит до 1 метра. В летнее время вода в Каракуле прогревается только до +12°C, причем такая температура бывает лишь на поверхностном слое, а на глубине озеро остается очень холодным [2]. Вода в озере Каракуль солоноватая, непригодная для питья. Минерализация по хлору составляет от 1180 мг/л до 1560 мг/л, несколько повышаясь ко дну. Соленость поверхностных вод озера в восточной части около 1.3%, в западной 0.9%. (см. рис. 1). Климат здешних мест характеризуется суровостью и крайней аридностью. По данным метеорологической станции Кара-Куль, построенной еще в 1933 году, на восточном берегу озера средняя годовая температура составляет -3.8°C. При этом средние температуры самого холодного и самого теплого месяцев составляют -8.0°C и 8.7°C соответственно. Абсолютный минимум температуры воздуха достигает -47°C, абсолютный максимум 28°C. Котловина бедна атмосферными осадками, в среднем здесь выпадает их 72 мм, но в отдельные годы эта величина снижается до 30-40 мм, а иногда до 20 мм [3]. Снежный покров на большей части побережья практически отсутствует, местами почва оголена в течение всей зимы, местами мощность снежного покрова составляет всего несколько сантиметров, очень редко 10-14 см.

Каракульская котловина – это высокогорная пустыня. Преобладают здесь скелетные примитивные палевые пустынные почвы, местами засоленные и растительный покров скуден. Чаще встречаются одиночные полукустарники терескена и солянки.

Район Каракуля отличается большим числом часов солнечного сияния, в среднем 75-80% годового. Самый солнечный месяц сентябрь (90%), самый пасмурный февраль (62%). Каракульская котловина одна из самых солнечных на Восточном Памире. Весьма характерной чертой климата котловины являются постоянные и сильные ветра, продолжительность которых в течение года насчитывается в среднем до 25 дней со скоростью ветра более 15 м/с, иногда они достигают 20 м/с, а редко даже 30 м/с. Наиболее ветрены март и апрель [4, 5].

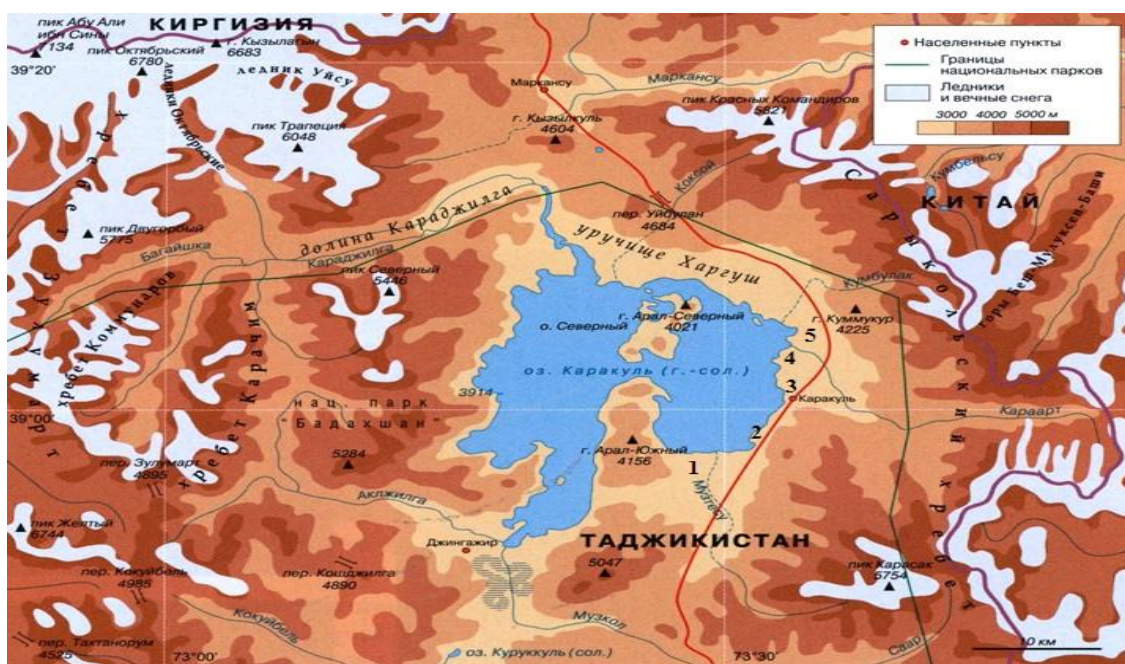


Рис. 1. Озеро Каракуль

Следует отметить, что самый крупный естественный водоем Таджикистана, озеро Каракуль, еще не рассматривался в качестве энергетического ресурса.

**Потенциальные энергетические ресурсы солнечной энергии в районе озера Каракуль.** Исследуемая территория озера Каракуль, известна своей большой суммарной годовой солнечной радиацией ( $9\ 200\ \text{МДж}/\text{м}^2$  или  $850\ \text{Вт}/\text{м}^2$ ), продолжительностью солнечного сияния (3166 часов в год), а также минимальным числом дней без солнца – (7) [6, 7]. Отметим, что в процессе изменения солнечного излучения (СИ) на Земле во времени и пространстве есть закономерные и случайные составляющие. Они значительно затрудняют получение достоверных данных для энергетических расчетов из-за относительно коротких рядов наблюдений за СИ на Земле, а также нехватки стационарных точек наблюдения за СИ в Таджикистане в целом и Восточного Памира в частности. Следовательно, на первом этапе оценка энергетических ресурсов и расчетов базируется на результатах прошлых исследований солнечной энергии.

Солнечное излучение на поверхности Земли – это рассеянная энергия, которая во много раз меньше, чем подобная удельная энергия на  $1\ \text{м}^2$  полезной площади в традиционных электрических станциях. В связи с этим, для создания мощных системных СЭС, требуется больше площади, чем для ТЭС, ГЭС и АЭС аналогичной мощности. Именно этот земельный фактор достаточно чувствителен для развития масштабных солнечных электрических станций, на равнинную территорию Таджикистана исходя из его ограниченности полезными земельными ресурсами (всего 7% от всей площади), которые недостаточны даже для полного обеспечения продовольственной безопасности страны.

На Восточном Памире, картина совсем другая, особенно на территории вокруг озера Каракуль, главным образом на его восточных берегах. Вследствие природно-климатических ограничений, земельные ресурсы, независимо от больших объемов (около 70 млн. кв. метр), являются полностью не пригодными для сельскохозяйственного использования и не относятся даже к пастбищным категориям.

При оценке предполагаемых потенциальных, технических и экономических ресурсов солнечной энергии вокруг озера Каракуль, в первую очередь требовалось определить размер общей полезной площади, где будет размещаться солнечная электрическая станция (СЭС) совместно со всеми системами жизнедеятельности энергетического комплекса. Для выполнения данной работы использовалась карта (рис.1) и возможности программы Google Earth. Выявленные и пронумерованные свободные, практически горизонтально ровные площадки, показаны на рис. 1 и занесены в табл. 1.

Таблица 1

Таблица свободных площадей на восточном берегу Каракуля

| Нумерация участков по карте | Размер площади, км <sup>2</sup> | Предварительная общая характеристика   |
|-----------------------------|---------------------------------|--|
| 1                           | 29.48                           | Занимаемая территория указанных участков относится к высокогорным пустыням. Практически горизонтально ровные свободные площади, без растительности. Встречаются отдельные кусты терескена. В летнее время, в течении 10-15 часов в сутки сияет солнце. |
| 2                           | 3.74                            |  |
| 3                           | 1.51                            |  |
| 4                           | 9.26                            |  |
| 5                           | 9.93                            |  |
| 6                           | 13.97                           |  |
| Итого:                      | 67.89                           |  |

Напомним, что Восточный Памир расположен в зоне так называемого «мирового солнечного пояса» и его климат характеризуется значительными суточными и сезонными колебаниями воздуха, малым количеством осадков, сухостью воздуха, малой облачностью и продолжительностью сияния 2100-3166 часов в год, а количество солнечных дней в году колеблется от 213 до 300. Годовые значения суммарной радиации при ясном небе составляют 8600-9200 МДж/м<sup>2</sup>, а сумма прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность колеблется вокруг озера Каракуль до 8200 МДж/м<sup>2</sup>. Здесь же наблюдается наибольшая продолжительность солнечного сияния около 3166 часов в году. Среднесуточное значение теоретического солнечного облучения для данной местности в ясный день на высоте 4000 метров над уровнем моря, исходя из максимального значения 9200 МДж/м<sup>2</sup> принимается около 400 Вт/м<sup>2</sup>, тогда как по Таджикистану оно составляет 228 Вт/м<sup>2</sup> [6].

По изложенным выше исходным данным выполнен расчет оценки общих, технических и экономических ресурсов солнечной энергии на территории восточного берега озера Каракуль. При общей площади исследуемой территории, равной 67.89 км<sup>2</sup>, это дает общую среднегодовую мощность  $67\ 890\ 000 \times 0.4 = 27\ 156$  МВт. Учитывая, что общее количество солнечных дней для данного региона в году составляет 80%, получим  $27\ 156 \times 0.8 = 21\ 725$  мВт. Технический потенциал характеризует ту часть солнечной энергии, которую можно

использовать технически. Сегодня уровень полезной мощности в технологии производства солнечной панели достиг в среднем 18-20% от падающего солнечного облучения, и технический потенциал солнечной мощности составляет  $21\ 725 \times 0.2 = 4\ 345$  МВт. Известно, что экономически эффективный потенциал определяет ту часть технического потенциала, которую в настоящее время экономически целесообразно использовать, и он базируется на технико-экономическом сравнении с альтернативными источниками электроэнергии, в качестве которых в Таджикистане выступают гидроэлектрические станции (ГЭС). Как было сказано выше, строительство крупных ГЭС требует больших капиталовложений и имеет длительные сроки строительства, и в этом плане поиск новых альтернативных источников энергии, в особенности использование ресурсов солнечного потенциала, приобретает первостепенное значение для развития топливно-энергетического комплекса страны. В связи с этим можно констатировать, что при данных условиях, выявленный технический потенциал 4 345 мВт на восточном берегу озера Каракуль является экономически эффективной мощностью солнечных ресурсов.

Таким образом, наличие большого солнечного излучения наряду со свободной и идеально ровной территорией вокруг озера Каракуль создает прекрасные условия для строительства крупнейшей в Таджикистане по мощности СЭС, для организации в этом регионе производства промышленного водорода как технологического энергоносителя нового поколения.

**Солнечная электрическая станция в составе промышленного комплекса.** Освоение энергетических ресурсов солнечной энергии осуществляется такими же методами, какие приняты при реализации других известных источников энергии – гидроэнергии, тепла и атомной энергии. В практике проектирования принято выполнить следующие этапы:

1. определение расположения объекта;
2. предварительное технико-экономическое обоснование энергетического объекта (ТЭО);
3. окончательный вариант ТЭО по конкретному проекту;
4. подготовительные работы по организации строительства;
5. рабочее или детальное проектирование, включающее согласование и привязку технических решений в ТЭО на строительную площадку и разработку комплекса технических документаций по объекту;
6. строительно-монтажные и пуско-наладочные работы.

В данной статье исследуется вариант строительства солнечной электростанции (СЭС) без аккумуляирования энергии для создания промышленного кластера по производству технологического водорода в Таджикистане. За расчетную мощность СЭС в данном исследовании принимаем выявленное значение 4 345 мВт. Перечислим основные характеристики СЭС (см. табл. 2):



1. СЭС работает в автономном режиме без системы аккумулирования электроэнергии (работа промышленного комплекса полностью планируется на использовании постоянного тока, включая, собственное потребление и инфраструктуры);
  2. инсоляция выбранного района размещения 2555 кВт.ч/м<sup>2</sup>/год.
  3. полезная площадь для приема солнечной радиации 67 890 000 м<sup>2</sup>;
  4. среднедневное значение теоретического солнечного облучения 400 Вт/м<sup>2</sup>;
  5. планируемая мощность СЭС 4 345 мВт;
  6. тип солнечных модулей монокристаллический;
  7. мощность солнечных модулей 400 Вт;
  8. количество солнечных модулей 8 687 500 шт.;
  9. КПД солнечных модулей 20%;
  10. количество солнечных часов в году 3166 час;
  11. удельная стоимость одного кВт 400 \$/кВт;
  12. ключевые особенности:  
нет вредных выбросов, вибрации и шума;  
нет опасных электромагнитных полей, высоких температур и влияния на атмосферу;
- солнечные электростанции полностью автономны и требуют минимального обслуживания;
- срок службы компонентов более 25 лет;
- конструкция СЭС проста и надежна;
- высокий уровень ремонтпригодности.

Таблица 2

Технико-экономические показатели солнечной электрической станции  
на берегу озера Каракуль

| №  | Показатели                          | Единицы измерения | Сумма      |
|----|-------------------------------------|-------------------|------------|
| 1. | Установленная мощность              | мВт               | 4 345      |
| 2. | Количество солнечных часов в году   | час               | 3 166      |
| 3. | Годовое производство электроэнергии | тыс. кВт.ч.       | 13 756 270 |
| 4. | Удельная стоимость инвестиций       | \$US./кВт         | 400        |
| 5. | Капиталовложения                    | тыс. \$US         | 1 738 000  |
| 6. | Эксплуатационные расходы            | тыс. \$US         | 69 520     |
| 7. | Себестоимость электроэнергии        | цент US           | 0.50       |

Основная особенность солнечных электростанций – долгий срок службы и необходимость в минимальном обслуживании. Достаточно лишь мыть и очищать их от пыли 2-3 раза в период с весны по осень. Следовательно, эксплуатационные расходы по СЭС принимаются в размере 4% от первоначальных капитальных затрат. Например, при оценке проектов ГЭС они составляют 2.4%, а для СЭС с аккумулированием электроэнергии, работающей в составе энергосистемы, равны 8-10%.

Для сравнения показываем в табл. 3 показатели себестоимости электроэнергии на электрических станциях различных типов.

Таблица 3

Показатели себестоимости электроэнергии на электрических станциях различных типов

| Энергоноситель | Технология                           | Себестоимость, цент/кВт.ч. |
|----------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Уголь          | Паротурбинные                        | 5.70 – 6.80                |
|                | Парогазовые                          | 5.26 - 6.70                |
| Газ            | Парогазовые                          | 5.40 – 5.70                |
|                | ТЭС на основе ГТУ                    | 5.40                       |
| Атом           | АЭС                                  | 2.5 - 6.0                  |
| Вода           | Крупные ГЭС                          | 1.0 - 8.0                  |
|                | Малые ГЭС                            | 6.0                        |
| Альтернативные | ЭС на биомассе                       | 7.60                       |
|                | Геотермальные                        | 6.50 - 31.0                |
|                | Солнечные с аккумулированием энергии | 15.0 – 20.0                |
|                | Ветровые                             | 3.60                       |

Отметим, что близкие вопросы рассматривались также в работах [8, 9].

**Заключение.** Результаты исследования по созданию кластера для производства технологического (зеленого) водорода на базе использования солнечной энергии на берегу озера Каракуль показали положительный результат. Следовательно, данный проект имеет все основания для реализации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М., Илолов М., Расулов С., Кодиров А.С., Рахматов Дж.Ш. Схема энергетического освоения водных ресурсов реки Каратаг. – Известия АН РТ. Отд. физ-мат., хим., геол. и техн. н. №3(180), 2020, с. 143-152.
2. Таджикистан (Природа и природные ресурсы). – Душанбе: Дониш, 1982, 260 с.
3. Гурвич В.Ф. Озеро Каракуль как среда обитания. – Ташкент: изд-во САГУ, 1958, 69 с.
4. Zandler H., Mislimshoeva B., and Samimi C. Scenarios of Solar Energy Use on the “Roof of the World”: Potentials and Environmental Benefits. – Mountain Research and Development, 2016, v. 36, №3, pp. 256-266, doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15- 00077.1.
5. Kraudzun T., Vanselow K. A., Samimi C. Realities and myths of the Teresken Syndrome- -an evaluation of the exploitation of dwarf shrub resources in the Eastern Pamirs of Tajikistan. – J. Environ Manage, 2014, v. 132, pp. 49-59, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.10.019. Epub 2013 Nov 27. PMID: 24291577.
6. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М., Кабутов К., Каримов Х.С. Общая оценка ситуации в энергетике в мире и Таджикистане. – Изв.АН РТ. Отд. физ-мат., хим., геол. и техн. н. №2 (135), 2009, с. 101-111.
7. Ёрмахмадзода Б. Оценка энергетического потенциала возобновляемых источников энергии Республики Таджикистан. [Текст]: магистерская дис. – Новосибирск, 2016, 102 с.
8. Ilolov M., Kabirov Sh., Ilolov A.M. On the electrolytic method of producing solar-grade silicon: Innovations and new technologies. – AIP Conference Proceedings. 2018, v.1999, doi: 10. 1063/1. 5049327, p.130008.

9. Ilolov M., Ilolov A., Inagaki F. and Rahmatov J. Stochastic Fractality of the Gilondi Geothermal Reservoir. – Proceedings of 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 6-8, 2023 SGP-TR-224

М.ИЛОЛОВ, С.О.КАБИРОВ\*, С.РАСУЛОВ, Ҷ.Ш.РАҲМАТОВ, Н.Ш.ЮСУФБЕКОВ  
**ДАР БОРАИ ЗАХИРАҶОИ ЭНЕРГЕТИКИИ ОҒТОБ ВА ИСТЕҲСОЛИ  
ҲИДРОГЕНИ САБЗ ДАР МАВЗЕИ КҮЛИ ҚАРОКҮЛ (ПОМИРИ ШАРҚӢ)**

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои нави АМИ Тоҷикистон,  
\*Вазорати саноат ва технологияҳои нави Ҷумҳурии Тоҷикистон*

Ҳадафи ин тадқиқот арзёбии имкони ташкили истеҳсоли саноатии ҳидроген дар Тоҷикистон бо дарназардошти дастовардҳои пешрафти илмию техникӣ дар ин самт аз ҷониби кишварҳои пешрафтаи технологии ИМА, Британияи Кабир, Ҷопон, Канада, Олмон, Русия, Чин, Кореяи Ҷанубӣ ва ғайра мебошад. Ҳамчун объекти тадқиқот ҳудуди соҳили кули Қарокул аз ҷиҳати сер будан аз радиатсияи офтоб, мавҷудияти ҳаҷми кофии захираҳои об, инчунин ҷойгиршавии наздики ҷуғрофӣ бо бозорҳои истеъмоли энергия – минтақаи мусоиди Помири Шарқӣ ба ҳисоб меравад.

**Калимаҳои калидӣ:** кули Қарокул, радиатсияи офтоб, нерӯгоҳи барқӣ офтобӣ (НБО).

M.ILOLOV, Sh.O.KABIROV\*, S.RASULOV, J.Sh.RAHMATOV, N.Sh.YUSUFBEKOV  
**ON POTENTIAL ENERGY RESOURCES OF SOLAR ENERGY AND GREEN  
HYDROGEN PRODUCTION IN THE REGION OF LAKE KARAKUL  
(EASTERN PAMIR)**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
Center of Innovative Development of Science and New Technologies,  
\*Ministry of Industry and New Technologies of the Republic of Tajikistan*

This study aims to assess the possibilities of organizing industrial production of hydrogen in Tajikistan, taking into account the achievements of scientific and technological progress in this area by high-tech countries such as the USA, Great Britain, Japan, Canada, Germany, Russia, China and South Korea and others. The object of the study is the territory on the shore of Lake Karakul as the most favorable region of the Eastern Pamirs in terms of saturation of solar radiation fluxes, the availability of sufficient water resources, as well as its close geographical location with energy consumption markets.

**Key words:** Karakul lake, solar radiation, solar power station (SPS).

**Сведения об авторах:**

**Мамадшо Илолов** – доктор физико-математических наук, профессор, академик НАНТ, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана, заведующий отделом математического моделирования динамических процессов. E-mail: ilolov.mamadsho@gmail.com

**Шерали Олимович Кабиров** – доктор экономических наук, Министерство промышленности и новых технологий Республики Таджикистан, министр.

**Сабур Расулов** – кандидат экономических наук, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования динамических процессов. E-mail: sabur.rasulov@mail.ru

**Джамшед Шавкатович Рахматов** – Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана, заместитель директора. E-mail: jamesdoo7@rambler.ru

**Наримон Шодихонович Юсуфбеков** – Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана, научный сотрудник отдела математического моделирования динамических процессов. E-mail: nyusufbekov@mail.ru

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

**АКАДЕМИК ХАЙДАР САФИЕВ – СОЗДАТЕЛЬ НОВОГО НАУЧНОГО  
НАПРАВЛЕНИЯ ПО ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ТАДЖИКИСТАНЕ**



20 января 2023 года на 73-м году жизни скончался выдающийся учёный, академик Национальной академии наук Таджикистана директор НИИ металлургии ТАЛКО Хайдар Сафиев.

Вся жизнь академика Х.Сафиева связана с разработкой новых технологических процессов по комплексной переработке минерального сырья Таджикистана.

Х.Сафиев родился в 1950 г., в г. Кулябе Таджикской ССР. В 1972 г. с отличием окончил Киевский политехнический институт по специальности «Технология неорганических веществ», кандидат технических и доктор химических наук, профессор, академик НАНТ.

Трудовая деятельность с 1972 г. по настоящее время: лаборант, ассистент кафедры Таджикского политехнического института, аспирант Киевского политехнического института, старший преподаватель, заведующий кафедрой Кулябского госпединститута, заместитель заведующего отделом науки, техники высших и средних специальных учебных заведений УД Совета Министров Таджикской ССР, заведующий лабораторией Института химии им. В.И.Никитина АН Республики Таджикистан, заместитель начальника технического отдела Таджикского алюминиевого завода, главный учёный секретарь АН Республики Таджикистан, член Президиума АН Республики Таджикистан (2000-2010 гг.), ректор Таджикского государственного национального университета, главный редактор Вестника Таджикского национального государственного университета, советник Президента Республики Таджикистан по вопросам науки и высоким технологиям, директор Государственного учреждения «Научно-исследовательский институт металлургии» Государственного унитарного предприятия «Таджикская Алюминиевая Компания».

С учётом научных и организационных заслуг, связанных с созданием в Таджикистане нового научного направления по химии и технологии комплексной переработки минерального сырья и отходов, вклад в научно-организационную деятельность Академии наук Республики Таджикистан и Таджикского национального университета, в 2014 году Х.Сафиев был избран действительным членом (академиком) Академии наук Республики Таджикистан по специальности «Химия».

Х.Сафиев являлся известным специалистом в области химии и технологии неорганических веществ. Он впервые в Таджикистане начал систематические исследования в области комплексной переработки минерального сырья и промышленных отходов. Более 40 лет под его руководством проводились фундаментальные исследования в области химии и технологии неорганических веществ. Результаты этих исследований позволили разработать ряд принципиальных технологических схем комплексной переработки алюмосиликатных руд хлорными, кислотными и спекательными способами. При этом особое внимание он уделял вопросам утилизации промышленных отходов, использованию местного сырья в качестве исходных материалов, а также экологическим проблемам химической, металлургической и горнорудной промышленности. Так, при непосредственном руководстве и участии профессора Х.Сафиева в настоящее время научно обоснован и разработан ряд технологий переработки содержимого склада твёрдых отходов и шламовых полей ГУП «TALCO» с получением криолит-глинозёмного концентрата, огнеупорной продукции, флюса для литейного производства, коагулянта для очистки воды, соды, жидкого стекла и др. Неценима заслуга Х.Сафиева в развитии других направлений химии и химической технологии, в частности, нефте- и углехимии. Ещё будучи ректором ТГНУ, он ставил и решал задачи по развитию указанных направлений, что, несомненно, сыграло позитивную роль впоследствии – при промышленном запуске угольных газогенераторов для обеспечения производственных нужд ГУП «TALCO», Восточной котельной г. Душанбе и предприятия «TALCO Кимиё» (г. Яван) синтетическим углеводородным газом.

Разработки Х.Сафиева в своё время были успешно апробированы и внедрены на Сумском ПО «Химпром» (Украина), Турсунадевском фарфоровом заводе, МП «Падида», ГУП «Душанбеводоканал». Он являлся автором более 400 научных работ, в том числе 12 монографий и учебников. Новизна научных разработок Х.Сафиева подтверждена более чем 30 охранными документами на изобретение: авторскими свидетельствами СССР, евразийскими патентами, патентами Российской Федерации и Республики Таджикистан. Под его руководством и непосредственном участии защищены 11 кандидатских и 4 докторские диссертации. В 2001 году Х.Сафиев был удостоен звания лауреата Государственной премии имени Абуали ибн Сино в области науки и техники, а в 2002 году – звания лауреата Международной премии ЭКО в области науки и технологии.



Академик Х.Сафиев с академиком У.Мирсаидовым.

Научная деятельность учёного тесно связана с педагогической. Х.Сафиев читал циклы лекций в Таджикском национальном университете и Таджикском техническом университете. Он прошёл все ступени педагогической деятельности в высшей школе: лаборант, ассистент, старший преподаватель, доцент, профессор кафедры и ректор ТГНУ, действительный член (академик) Таджикского отделения Международной академии наук высшей школы. Много усилий приложил для организации материально-технической и научно-лабораторной базы во вновь созданных ГУ «Научно-исследовательский институт металлургии» ГУП «ТАЛСО» и Научно-исследовательском институте ТНУ, а также для организации учебного процесса по новым специальностям на химических факультетах Национального и Технического университетов. За успешную научную и педагогическую деятельность неоднократно был награждён почётными грамотами Министерства образования республики и вузов.

Являлся членом Координационного комитета Международного научно-технического центра (г. Москва, г. Астана), Комитета по Государственным премиям Республики Таджикистан им. Абуали ибн Сино в области науки и техники, Диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций при Институте химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана.

Одной из значимых вех в трудовой биографии Х.Сафиева, и на этом уместно сделать акцент – учитывая трудности переходного периода, являлась деятельность на должности ректора Таджикского государственного национального университета (2001-2005 гг.).

Несколько опережая своё время, учёный-руководитель заложил перспективную стратегическую линию развития высшей школы, выделив в качестве основных постулатов тесную взаимосвязь фундаментальной и прикладной науки, разрешение противоречий между накопившимся объёмом знаний и их усвоением, единство науки и образования с социально-экономическим развитием общества.

Имя Х.Сафиева известно и за пределами Республики Таджикистан, труды учёного опубликованы и цитируются в странах ближнего (Российская Федерация, Республика Беларусь, Украина и др.) и дальнего зарубежья (США, Бельгия, КНР, Турция, Румыния и др.).

В соответствии с Постановлением Правительства Республики Таджикистан № 613 от 31.10.2009 г. по инициативе и непосредственной поддержке Президента Республики Таджикистан, уважаемого Эмомали Рахмона, было создано Государственное учреждение «Научно-исследовательский институт металлургии» Государственного унитарного предприятия «Таджикская Алюминиевая Компания» (ГУ «НИИМ» ГУП «TALCO»), директором которого был назначен Х.Сафиев.

Трудно переоценить роль Х.Сафиева как учёного и руководителя в создании и становлении ГУ «НИИМ» ГУП «TALCO», являющегося непосредственным «мостом» между фундаментальной и прикладной наукой и призванного обеспечить перспективное научно-методологическое развитие целого промышленного комплекса, включающего предприятия металлургической, горнорудной и химической промышленности.

В соответствии с Программой перехода ГУП «TALCO» на местное сырьё, под руководством Х.Сафиева проводились исследования по разработке и апробированию в промышленном масштабе ряда технологий комплексной переработки глинозём-, углеродсодержащего сырья отечественных месторождений (нефелиновых сиенитов «Турпи», каолиновых глин «Зидды», ставролит-мусковитовых сланцев «Курговад» и антрацитов «Назар-Айлок») и промышленных отходов ГУП «TALCO»: шлама газоочистки, отсева склада твёрдых отходов, угольной электролитной пены, отработанных электродных блоков, а также золы и золошлаков, образующихся при производстве синтез-газа на ГУП «ТалКо» и сжигании угля на ТЭЦ-2 г. Душанбе, с получением глинозёма, криолита, фторида алюминия, электродной и огнеупорной продукции, графита, флюса, строительных материалов и др., которые способствовали рациональному использованию сырьевых ресурсов, а также весомому вкладу в охрану окружающей среды и сохранению экологического равновесия в зоне действия промышленных предприятий республики.

Х.Сафиев принимал активное участие в подготовке к пуску предприятия «TALCO Кимиё» (г. Яван) по производству серной кислоты, криолита и фторида алюминия. В торжественных мероприятиях, посвящённых этому знаменательному событию и проведённых при участии и под руководством Основателя мира и национального единства, Лидера нации, Президента Республики Таджикистан уважаемого Эмомали Рахмона, Х.Сафиев выступил с тематическими презентациями, и Президент страны высоко оценил его работы в этом нужном направлении.



Отличительные черты школы Х.Сафиева - широта интересов, разнообразие методов исследований, оригинальность трактовки научных результатов, являющихся фундаментом для новых экспериментов, чётко поставленная цель с получением прогнозируемых результатов, инновационная деятельность с внедрением научных достижений в производство.

Интуиция, основанная на глубоких знаниях, опыте, широте и оперативности мышления, позволяли учёному оценивать перспективное развитие химической технологии в области создания безотходных технологий и охраны окружающей среды.

Он всегда относился внимательно к своим коллегам, высокий интеллект, внутренняя энергия, щедрость души вызывали огромное уважение к профессору Х.Сафиеву, как к личности большого масштаба.

В начале 90-х годов XX века, в трудные годы становления независимости Таджикской государственности, Х.Сафиев внёс неоценимый вклад в сохранение и развитие науки; чувство глубокого патриотизма стало основным мотивом научной и общественной деятельности Х.Сафиева, что привело его в ряды сторонников восстановления мира и нормализации обстановки в республике.

Научные достижения академика Х.Сафиева крупными буквами вписаны в историю развития отечественной науки и промышленности, основанная им научная школа, безусловно, способствует подготовке и воспитанию целой плеяды учёных.

Очень жаль, что он так рано, в расцвете творческих сил ушёл, не успев реализовать все свои планы. Уверен, что его ученики и коллеги продолжат его дела. Светлая память о Х.Сафиеве всегда в наших сердцах.

*У.М.Мирсаидов, Ф.Рахими, Г.И.Кохирова,  
Д.Х.Халиков, И.Н.Ганиев*

ПАМЯТИ УЧЁНОГО

**АКАДЕМИК САИДМУХАММАД ОДИНАЕВ**  
**(19.10.1942 – 03.08.2023)**



03 августа 2023 года на 81-м году жизни скончался академик Национальной академии наук Таджикистана (2008), Заслуженный деятель науки и техники Республики Таджикистан (2019), Отличник народного образования Таджикской ССР (1975), доктор физико-математических наук (1995), директор Физико-технического института им. С.У.Умарова Академии наук Республики Таджикистан (1999-2001), ректор Таджикского технического университета им. М.С.Осими (2001-2005), ректор Таджикского национального университета (2005-2008), член Маджлиси милли Маджлиси Оли Республики Таджикистан (2005-2010), вице-президент Национальной академии наук Таджикистана (2010-2016),

главный научный сотрудник Физико-технического института им. С.У.Умарова Национальной академии наук Таджикистана (2016-2023), лауреат Межгосударственной премии «Звезды Содружества» (2022), известный ученый в области статистической теории жидкого состояния вещества – Саидмухаммад Одинаев.

Академик Саидмухаммад Одинаев широко известен среди физической научной общности в пространстве Содружества Независимых Государств своими научными результатами и публикациями, приложениями научных результатов и разработанными методами исследования микроскопического строения конденсированных сред. Им разработаны оригинальные способы описания классических систем в конденсированных средах и развиты теоретические методы исследования равновесных и неравновесных статистических систем, на основе метода кинетических уравнений. Многолетние научные исследования академика Саидмухаммад Одинаева нашли отражение в серии фундаментальных и теоретических работ, посвященные развитию молекулярно-кинетической теории, изучению

структуры, явлений переноса, а также упругих и акустических свойств жидкостей и их растворов с учетом вкладов различных внутренних релаксационных процессов.

Саидмухаммад Одинаев родился 19 октября 1942 года в районе Ховалинг Таджикской ССР. По окончании 7-летней школы поступил в Педагогическое училище г. Куляба, а затем в 1960 году на физико-математический факультет Таджикского государственного университета им. В.И.Ленина, который успешно закончил в 1965 году и был направлен на должность ассистента кафедры теоретической физики данного университета (1965-1966 гг.). В 1966-1967 гг. служил в рядах Вооруженных сил СССР. С 1968 по 1988 гг. продолжил исследовательскую деятельность в Физико-техническом институте им. С.Умарова Академии наук Таджикской ССР. В этот период, в 1983 году С.Одинаев успешно защищает кандидатскую диссертацию на тему «Некоторые вопросы молекулярной теории вязкоупругих свойств простых жидкостей».

Одновременно с исследовательской работой С.Одинаев проводит большую научно-организационную деятельность. Так, в течение более 20 лет с 1971 по 1992 гг. С.Одинаев как перспективный молодой учёный принимал активное участие в организации Таджикской летней физико-математической и химической школы, организатором которого был Президент Академии наук Таджикской ССР академик М.С.Осими. В этот промежуток времени с октября 1975 по 1989 гг. при ФТИ им. С.У.Умарова АН Таджикской ССР, совместно с сотрудниками сектора теоретической физики С.Одинаевым была организована «Школа юных физиков» для учащихся средних школ г. Душанбе и районов республиканского подчинения.

В 1988-1996 гг. С.Одинаев занимался научно-учебной деятельностью в должности доцента, а с 1996-1999 гг. - профессора кафедры общей физики ТГУ им. В.И.Ленина. В этот период, в 1995 году, С.Одинаев успешно защищает докторскую диссертацию на тему «Вопросы молекулярной теории структурной релаксации, явлений переноса и упругие свойства классических жидкостей».

Учитывая его эффективную научно-организационную деятельность, профессор Саидмухаммад Одинаев в 1999 году был назначен директором ФТИ им. С.Умарова Академии наук Республики Таджикистан. Далее с 2001 года профессор Саидмухаммад Одинаев руководил деятельностью двух ключевых высших учебных заведений страны – Таджикским техническим университетом им. академика М.С.Осими (2001-2005 гг.) и Таджикским национальным университетом (2005-2008 гг.). Академик С.Одинаев в данном периоде внес значительный вклад в систематизацию учебного процесса в высших профессиональных учебных заведениях, адаптировал подготовку специалистов к требованиям экономики страны, приблизил содержание и качество подготовки специалистов к стандартам регионального и мирового образовательного пространства.

За время своей деятельности в Маджлиси милли Маджлиси Оли Республики Таджикистан (2005-2010 гг.) в направлении реализации созидательной политики в сфере науки и образования, приложил немало усилий по адаптации подготовки специалистов и

научно-исследовательских работ к достижениям экономики республики, в том числе реализации стратегических целей страны.

С 2010 по 2016 гг. академик Саидмухаммад Одинаев в должности вице-президента Академии наук Республики Таджикистан руководил Отделением физико-математических, химических, геологических и технических наук. Академик С.Одинаев внес неоценимый вклад в развитие и популяризацию естественных, точных и математических наук, которые считаются одним из важнейших вопросов современного общества. С 2016 года до конца своих дней академик С.Одинаев занимался активной научной деятельностью в должности главного научного сотрудника сектора теоретической физики отдела наноматериалов и нанотехнологий Физико-технического института им. С.У.Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

Академиком Саидмухаммадом Одинаевым на основе цепочки уравнений Боголюбова были получены обобщенные кинетические уравнения для одно- и двух-частичной функции распределения, учитывающие вклады пространственной корреляций плотности и корреляции скоростей. Выведены уравнения Смолуховского для бинарной плотности и бинарного потока частиц в конфигурационном пространстве, найдены их общие решения, которые обеспечивают замкнутость исходных кинетических уравнений и описывают процесс структурной релаксации. Показано, что процесс перестройки структуры жидкостей происходит по закону диффузии и описывается непрерывным спектром времен релаксации. Впервые установлено, что дальневременное поведение фундаментальных решений уравнения для бинарной плотности и бинарного потока частиц совпадает с дальневременными асимптотиками автокорреляционных функций. На основе кинетического уравнения для одно-частичной функции распределения им получена система уравнений обобщенной гидродинамики, описывающая неравновесное состояние жидкости и входящие в нее динамические комплексные кинетические коэффициенты. Также академиком Саидмухаммадом Одинаевым получено уравнение для одно-частичной функции распределения с обобщенным потенциалом Власова, на основе которого исследуются электроупругие и диэлектрические свойства растворов электролитов.

Начиная с 2000 года, наряду с вышеизложенными исследованиями классических жидкостей, научные работы академика Саидмухаммада Одинаева были посвящены, также изучению природы релаксационных процессов, явлений переноса, упругих, акустических, электропроводящих и диэлектрических свойств растворов электролитов.

Под руководством академика С.Одинаева защищено 7 кандидатских и 2 докторские диссертации. С.Одинаев является автором и соавтором более 300 научных работ, в том числе двух монографий «Молекулярная теория структурной релаксации и явлений переноса в жидкостях» (1998г.) (в соавторстве с Адхамовым А.А.) и «Теория релаксационных процессов, явлений переноса, упругих и акустических свойств растворов электролитов» (2022г.) (в соавторстве с Акдоновым Д.М.). Также им изданы 5 учебных пособий. Научные работы академика Саидмухаммада Одинаева опубликованы в журналах «Доклады

Академии наук СССР», «Журнал физической химии», «Журнал структурной химии», «Акустический журнал» и «Теплофизика высоких температур» Академии наук России, «Украинский физический журнал», «Физика жидкого состояния», в препринте Института теоретической физики и Института физики конденсированных систем НАН Украины, «Доклады Национальной академии наук Таджикистана» и «Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук», «Journal Modern Physics letters B», «Chemical Physics (North – Holland)», «Journal of Condensed Matter Physics», «Journal of Molecular liquids», «Iranian Journal of Science and Technology. Transaction A» и других изданиях международного уровня.

Научно-организационная и общественная деятельность академика С.Одинаева очень широка и разнообразна. Академик С.Одинаев на протяжении всей своей карьеры был одним из активных популяризаторов достижений современной науки и техники среди общественности, особенно молодежи. Он привлекал общественность посредством непосредственных встреч, телевидения, радио и других средств массовой информации о необходимости умения использовать современную технику и технологию, особенно в изучении естественных наук для развития технического просвещения и устойчивого развития страны.

Сильная научная школа академика Саидмухаммада Одинаева, являющаяся эффективным и продуктивным продолжением научной области академика А.А.Адхамова, признана многими отечественными и зарубежными специалистами как мощная ветвь таджикской физики, которая ныне продолжается его учениками.

Ушел из жизни академик Саидмухаммад Одинаев, выбравший путь науки – благороднейшую область человеческой деятельности и по призванию и зову сердца отдавший служению ей свои 65 лет творческой деятельности. Но его образ, образ прежде всего скромного товарища и выдающегося целеустремленного учёного, руководителя-организатора, внесшего, несомненно, весомый вклад в развитие физической науки в Таджикистане, останется в благодарной памяти его коллег, учеников, сотрудников, друзей и близких.

*Ф.Рахими, Г.И.Кохирова, М.Илолов, У.М.Мирсаидов,  
Д.Х.Халиков, И.Н.Ганиев, Ф.Шокир, Т.Х.Салихов*